

CYCLE DE VIE DES HABITATIONS :
INTÉRÊT DU CARBONE BIOSOURCÉ

Par
Brieuc Thibault

Essai présenté au Centre universitaire de formation
en environnement et développement durable en vue
de l'obtention du grade de maître en environnement (M. Env)

Sous la direction de Pierre Etcheverry

MAÎTRISE EN ENVIRONNEMENT
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Juillet 2019

SOMMAIRE

Mots-clés : matériaux biosourcés, stockage du carbone, maison individuelle, écohabitation, gaz à effet de serre, changement climatique, analyse du cycle de vie.

Le secteur résidentiel est responsable d'une part substantielle des émissions globales de gaz à effet de serre, tant au niveau québécois que sur l'ensemble de la planète. De nombreux courants de pensée, qu'on peut regrouper sous l'appellation d'écohabitation, tentent de réduire les impacts des habitations à l'usage, mais aussi pendant leur construction. En effet, les matériaux usuels, comme le béton et l'acier, sont très contributeurs au réchauffement climatique. Une alternative mise en avant par ces courants de pensée est l'utilisation de matériaux issus directement d'êtres vivants, car ils possèdent des empreintes carbone bien plus faibles, on parle alors de matériaux biosourcés. Un avantage supplémentaire de ces matériaux est qu'ils constituent un stock de carbone, ce qui permet, à priori, une limitation de leur impact climatique. Dans cette thématique, l'objectif de cet essai est de juger la pertinence de ces matériaux biosourcés dans les maisons individuelles, en prenant en compte le bénéfice apporté par le mécanisme de stockage du carbone.

Le développement d'une méthode de comptabilisation dynamique des gaz à effet de serre et l'analyse du cycle de vie de différents scénarios ont permis de mettre en évidence une réduction significative de l'empreinte carbone des habitations usant de matériaux stockant le carbone. Parmi les chiffres clés, il est à mentionner la réduction de près de moitié de l'empreinte carbone des matériaux lorsque l'on passe d'une structure en béton à une structure en bois. Plus important encore, le remplacement de l'isolant par des matériaux issus de l'agriculture comme la chènevotte de chanvre, grâce au mécanisme de stockage du carbone, réduit encore ce bilan de 75 %. Mais l'usage de l'énergie durant la vie d'une habitation, en particulier pour son chauffage, demeure de loin la principale source de gaz à effet de serre.

Ces résultats démontrent l'intérêt majeur d'utiliser des matériaux d'origine agricole dans la construction, en particulier pour l'isolation, ainsi que l'importance de prendre en compte les phénomènes de stockages du carbone dans les matériaux. Mais ils incitent également à ne pas négliger l'impact de la consommation électrique, qui bien qu'étant hydroélectrique au Québec, participe grandement aux changements climatiques.

REMERCIEMENTS

Tout d’abord, un grand merci à mon directeur, Pierre Etcheverry, pour avoir su me challenger dans les moments de doutes et me recadrer dans mes divagations. Sans oublier, bien sûr, ses conseils cruciaux et ses précieuses corrections, sans quoi cet essai n’aurait pas été ce qu’il est. Merci également aux membres du SEREX (Service de recherche et d’expertise en transformation des produits forestiers), en particulier à Siafietou Kamano et Patrick Dallain, pour leur soutien tout du long de la rédaction et leurs commentaires avisés.

Cet essai étant l’aboutissement de mon parcours à l’Université de Sherbrooke. Je tiens à remercier les enseignants du Centre universitaire de formation en environnement et développement durable pour leur soutien et le savoir partagé tout au long de cette maîtrise. Un grand merci également à mes camarades de cohorte, toujours solidaire dans les bons moments et les passes difficiles. Une mention spéciale pour Lucas et nos interminables discussions nocturnes (et même parfois diurnes), notamment autour de mon choix de sujet.

J’en profite également pour remercier mon école française, Polytech' Orléans, de m’avoir offert cette précieuse opportunité de double diplôme à Sherbrooke.

Et surtout, comme un texte n’existe que par ceux qui le lisent, cher lecteur ou lectrice, je vous remercie !

Bonne lecture !

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1. L'ÉCOCONSTRUCTION ET SON ENVIRONNEMENT	4
1.1 Le secteur du bâtiment	4
1.1.1 Une industrie prospère.....	4
1.1.2 Un important émetteur de gaz à effet de serre (GES)	4
1.2 La maison individuelle	5
1.2.1 Un rêve américain	5
1.2.2 Un domaine en recul	6
1.3 L'habitation écologique.....	6
1.3.1 Une multitude de pratiques et de courants.....	6
1.3.2 Critique des pratiques actuelles	8
1.4 Les matériaux de construction	9
1.4.1 Les grandes familles de matériaux	9
1.4.2 Usages et pratiques actuelles.....	10
1.4.3 Les matériaux biosourcés	12
2. LES MATÉRIAUX BIOSOURCÉS, INTÉRÊTS ET LIMITES	15
2.1 Production et accessibilité des ressources.....	15
2.1.1 Production primaire	15
2.1.2 Les procédés industriels de transformation.....	17
2.1.3 Accessibilités et répartition territoriale	19
2.1.4 Le rôle du transport.....	19
2.1.5 Bâtir, une opération non sans conséquence	19
2.2 Efficacité énergétique	20
2.2.1 Chauffage et Isolation	20
2.2.2 Aération et qualité de l'air.....	22

2.3	Durabilité du bâti.....	22
2.3.1	Temps de vie des structures.....	23
2.3.2	Durabilité des isolants	25
2.4	Fin de vie	25
2.4.1	Potentiels de réutilisation	26
2.4.2	Le recyclage, une alternative.....	27
2.4.3	Gestion des déchets ultimes.	28
3.	LE STOCKAGE DU CARBONE	30
3.1	Principe chimique.....	30
3.1.1	Photosynthèse et création de biomasses.....	30
3.1.2	Respiration, décomposition et perturbation.....	31
3.1.3	Dégradation des matériaux biosourcés.....	32
3.2	Intérêt du stockage du carbone dans la lutte contre les changements climatiques	32
3.2.1	Le forçage radiatif.....	33
3.2.2	Des émissions atemporelles ?	34
3.2.3	Les changements climatiques, un modèle dynamique	34
3.2.4	Considération à long terme	36
3.3	Le stock de carbone forestier	37
3.3.1	Aux origines des matériaux biosourcés, postulat et hypothèse du stockage carbone	37
3.3.3	Impact des activités sylvicoles.....	39
3.3.4	Stock et durée de vie apparente des matériaux ligneux.....	41
3.3.5	Discussion	43
3.4	Prise en compte du carbone biosourcé dans les ACV	45
3.4.1	Les matériaux d'origine agricole, un cas particulier.....	46
3.4.2	Conséquence sur le forçage radiatif de l'habitation	46
4.	ANALYSE COMPARATIVE	48

4.1	Définitions des scénarios.....	48
4.1.2	Structure béton	49
4.1.3	Isolation d'origine agricole	50
4.2	Méthodologie	50
4.2.1	Les trois niveaux d'analyse	51
4.2.2	Choix et détail de l'outil d'ACV	53
4.3	Résultats	55
4.3.1	Le bilan en équivalent carbone	55
4.3.2	Dynamisme et forçage radiatif	56
4.3.3	Stockage du carbone	57
4.4	Discussion	58
4.4.1	Bilan	58
4.4.2	Limites	60
CONCLUSION		63
RÉFÉRENCE		66
BIBLIOGRAPHIE.....		73
ANNEXE- 1 LA FABRICATION DU CIMENT.....		74
ANNEXE- 2 BILAN DES MATÉRIAUX UTILISÉS PAR SCÉNARIO		75
ANNEXE- 3 COMPARATIF DES LOGICIEL D'ACV		76
ANNEXE- 4 TABLEAUX DES RÉSULTATS PAR NIVEAU D'ANALYSE		77

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Comparaison des âges de destruction des bâtiments suivant le type de structure	24
Figure 3.1	Équation bilan de la photosynthèse.....	31
Figure 3.2	Absorption et réémission du carbone terrestre	31
Figure 3.3	Forçage radiatif massique du CH ₄ et du CO ₂ au cours du temps	35
Figure 3.4	Cycle de vie du bois de construction.....	42
Figure 4.1	Équation et graphique du facteur de concentration du CO ₂ en fonction du temps.....	51
Figure 4.2	Pourcentage de réduction des émissions en fonction de l'année de l'émission	52
Figure 4.3	Bilan carbone classique.....	55
Figure 4.4	Variations des forçages radiatifs	56
Figure 4.5	Bilan carbone corrigé	57
Figure 4.6	Variations des forçages radiatifs avec et sans prise en compte du stockage du carbone...	57
Figure 4.7	Bilan carbone corrigé avec et sans prise en compte du stockage du carbone	58

LISTE DES ACRONYMES

ACV	Analyse du cycle de vie
ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
CBDCa	Conseil du bâtiment durable du Canada
CCQ	Commission de la construction du Québec
Cecobois	Centre d'expertise sur la construction commerciale en bois
CO ₂ -eq	Concentration en équivalent CO ₂
CSH	Silicates de calcium hydraté en notation cimentière
FR	Forçage radiatif
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GPP	<i>Gross primary production</i>
ILDC	<i>International reference life cycle data system</i>
LEED	<i>Leadership in energy and environmental design</i>
MDDELCC	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MFFP	Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
MRNFP	Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parc
NBP	<i>Net biome production</i>
NEP	<i>Net ecosystem production</i>
NPP	<i>Net primary production</i>
PRG	Potentiel de réchauffement global
PVC	Polychlorure de vinyle

INTRODUCTION

La question des changements climatiques prend une place de plus en plus prépondérante dans le débat public depuis maintenant près de cinq décennies. Les impacts mesurables de l'augmentation des températures concernent l'ensemble de la planète. La perturbation des régimes hydriques, la fonte des glaciers, l'augmentation des phénomènes climatiques extrêmes renforcent année après année la prise de conscience collective de la problématique. Les décideurs politiques, de la quasi-totalité des nations, entérinent régulièrement ce constat en annonçant des plans de réduction et d'adaptation. Le sommet de Rio et la convention-cadre des Nations unies en 1992, le protocole de Kyoto qui en découle lors de la 3^e conférence des parties en 1997 puis l'accord de Paris en 2014 lors de la 21^e sont des preuves de l'importance de cet enjeu mondial.

La responsabilité des gaz à effet de serre (GES), dans l'augmentation des températures moyennes est un solide consensus scientifique. Son caractère anthropique par contre a longtemps été discuté, mais s'affirme de plus en plus : le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) montait l'intervalle de confiance à 95 % lors de son cinquième rapport (2014). Les principaux gaz contributeurs sont aujourd'hui le dioxyde de carbone (CO₂) et le méthane (CH₄) (GIEC, 2013). Les bâtiments, autant dans la production des matériaux dont ils sont constitués, que dans leur construction puis leur utilisation comptent pour une part importante des émissions mondiales.

Au Québec l'usage des bâtiments, principalement le chauffage de l'air et de l'eau, est responsable de 10,8 % des émissions de GES de la province, dont 41,9 % lié au secteur résidentiel (Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques [MDDELCC], 2015). Pour faire le bilan du secteur, il faudrait rajouter les importantes émissions liées à la production, au transport, à la mise en œuvre et à la gestion en fin de vie des matériaux utilisés. À titre d'exemple, l'industrie cimentière représente au moins 5 % des émissions mondiales (Aubry, 2013).

La prépondérance du chauffage dans l'habitat québécois vient logiquement du climat, mais également de la superficie des habitations. Le Canada étant un des pays où les habitations ont la plus grande superficie, cela se répercute logiquement sur la demande énergétique (Wilson, 2014). Cette particularité canadienne peut être mise en perspective avec la grandeur du territoire, qui n'impose pas une concentration élevée de population. De plus, l'hiver long et rigoureux limite le temps passé en extérieur pendant une bonne partie de l'année. Ce faisant, le confort de l'habitat et la nécessité de pouvoir réellement vivre en intérieur poussent à augmenter la surface des logements.

Indirectement, une conséquence de la construction d'habitation est la définition d'un urbanisme et d'un mode de vie associé. La recherche de logement plus grand, et de plain-pied, poussent irrémédiablement à un étalement urbain. Cet étalement éloigne les lieux de vie et d'activités, et conséquemment augmente la distance de transport quotidien. Le transport étant une des activités particulièrement émettrices de GES, l'urbanisme et donc les choix géographiques d'implantation des habitations sont responsables indirectement d'une part importante de ces émissions.

Dans ce contexte où le Québec cherche à réduire considérablement ses GES, mais où les citoyens demeurent sensibles à leur niveau de vie et ne remettent pas en cause la taille et le confort de leur habitation, la question des alternatives aux constructions basées sur l'acier et le béton se pose. Une des alternatives en vogue est l'écoconstruction. Notamment sa volonté de remettre au cœur de nos maisons des matériaux issus de la biosphère, qui semblent plus respectueux de notre environnement.

La question alors centrale est celle du bienfondé de ce postulat : l'usage des matériaux biosourcés, donc issus directement d'êtres vivants, dans l'habitat est-il réellement bénéfique pour combattre les changements climatiques ?

Afin de pouvoir déterminer le bon moyen d'action pour répondre à un problème, il faut être capable de l'identifier précisément (le connaître), de le mesurer (le calculer) et de contrôler nos moyens d'action : c'est la règle des 3C (J. Laperrière, synthèse du cours ENV788, 27 novembre 2018). Un ensemble de méthodologies a été créé pour permettre d'atteindre cette règle : les analyses de cycle de vie (ACV).

Les ACV des bâtiments sont des outils qui permettent de nous orienter vers le meilleur scénario pour réduire les impacts environnementaux, en particulier les émissions de GES. Néanmoins, ces outils ne prennent généralement pas en compte la capacité à engendrer un stock de carbone que peuvent avoir les matériaux biosourcés. Les rares méthodes comme *Publicly Available Specification No. 2050* (PAS 2050) et celle développée par l'*International reference life cycle data system* (ILDC) *Handbook* prenant en compte ce stockage ne le font que de manières simplistes. En effet, elles considèrent chaque année de stockage comme une émission négative de 1 % du stock, jusqu'à l'atteinte des 100 %. De cette manière, un stock finalement émis la centième année ou après n'aura pas d'impact. (Pawelzik et al., 2013)

L'amélioration des techniques d'ACV semble être la clé pour permettre de comparer de manière fiable les maisons résidentielles en fonction des matériaux utilisés. Cela permet également de distinguer les méthodes alternatives bénéfiques pour l'environnement et celles qui, malheureusement, n'offrent pas de réel avantage.

En ce sens, l'objectif principal de cet essai est de juger la pertinence des matériaux biosourcés pour réduire le bilan carbone des maisons individuelles et plus particulièrement des écohabitations. Pour ce faire, quatre objectifs spécifiques sont visés. Le premier consiste à discuter des avantages et inconvénients des matériaux biosourcés sur l'ensemble de leur cycle de vie. Le but est ici d'offrir une comparaison avec les matériaux plus traditionnels, allant de l'extraction des matières premières jusqu'à l'élimination en fin de vie. Le second est d'interroger le mécanisme de stockage du carbone dans les matériaux biosourcés. En particulier, il s'agit de déterminer si l'on a bien affaire à un stock supplémentaire généré par la construction, ou bien un simple déplacement d'un réservoir de carbone à un autre. Le troisième objectif spécifique est de proposer une méthode permettant la prise en compte de ce potentiel stockage du carbone dans les ACV. Cet objectif assume la volonté d'être plus précis et juste que la règle des 1 % par an (ou assimilé) utilisée par certaines méthodes. Le quatrième objectif est d'analyser sommairement le cycle de vie de trois scénarios d'une même construction faisant varier les matériaux utilisés. Les scénarios seront basés sur le modèle de la maison ÉcoRésidence de l'Est 132 (ERE 132), une écoconstruction localisée dans les jardins de Métis. Pour ce faire, la méthode développée par le 3^e objectif sera exploitée.

Dans cet essai, le premier chapitre est consacré à une mise en contexte de l'écoconstruction québécoise. Il brossera un portrait rapide de l'état du secteur du bâtiment et du rôle de la maison individuelle dans la société actuelle. Puis il rentrera dans le vif du sujet en traitant différents mouvements de pensée engendrant le concept d'écoconstruction. Le second chapitre se focalise sur les matériaux biosourcés, comparant, tout au long de leur vie, leurs avantages et inconvénients vis-à-vis des matériaux considérés comme traditionnels. Le troisième chapitre s'attaque à l'épineuse question du stockage de carbone, d'abord en étudiant les principes chimiques sous-jacents, puis en s'interrogeant sur son intérêt dans le cadre de la lutte contre les changements climatiques. Enfin, il interrogera la réalité du phénomène dans le cas de matériaux d'origine forestière et agricole, avant de finir par présenter la façon dont il sera pris en compte dans les ACV. Le quatrième et dernier chapitre s'attèle de son côté à l'analyse des trois scénarios mentionnés dans les objectifs, qui seront tout d'abord définis avant d'en calculer un bilan carbone grâce à des ACV améliorées par la prise en compte du stockage du carbone. Enfin, il se conclut sur une discussion des résultats et des limites des calculs et plus généralement de l'essai.

1. L'ÉCOCONSTRUCTION ET SON ENVIRONNEMENT

L'intérêt des matériaux biosourcés dans les maisons individuelles ne peut être étudié sans saisir, au préalable, les enjeux généraux liés aux constructions individuelles et aux matériaux qui les composent. De plus, toute construction s'intègre dans son environnement géographique et influe sur l'aménagement du territoire local. Les maisons dites « écologiques » ne doivent donc pas être considérées comme totalement disjointes de l'urbanisme et de la gestion du territoire. Elles sont donc, malgré une volonté de rupture, liées au secteur de la construction et à ses implications sur la société.

1.1 Le secteur du bâtiment

Le domaine de la construction est généralement divisé en deux secteurs. D'une part les ouvrages de génie, autrement appelés travaux publics, ce qui comprend les routes, les barrages, les ports et autres infrastructures similaires. D'autre part les bâtiments, c'est-à-dire les logements, les institutions, les commerces et les bâtiments industriels.

1.1.1 Une industrie prospère

L'industrie de la construction représente plus de 25 000 entreprises implantées sur le sol québécois et quelque 250 000 emplois soit 5,5 % de la population active. Comparativement, dans le reste du Canada ce secteur emploie 8,3 % de la population active. Le secteur du bâtiment, par opposition aux travaux publics, correspond à 73 % de l'activité économique de cette industrie. Dans ce secteur, on peut distinguer les bâtiments industriels (5 %), les bâtiments institutionnels et commerciaux (22 %) et ceux résidentiels (73 %). (Commission de la construction du Québec [CCQ], 2018 ; Institut de la statistique du Québec, 2018b)

1.1.2 Un important émetteur de gaz à effet de serre (GES)

Malgré les efforts investis dans la rénovation des bâtiments et l'amélioration des performances énergétiques des nouvelles constructions, la consommation énergétique des bâtiments représente encore 10,8 % des émissions de GES du Québec (MDDELCC, 2015). Ce chiffre, déjà important, n'est qu'une estimation faible des émissions liées aux bâtiments. Pour avoir une idée plus précise des impacts du secteur, il faut également prendre en compte les émissions liées à l'exploitation des ressources, leurs transports, leurs transformations et leur utilisation pour construire les bâtiments. Par la suite, il faut également considérer les émissions qui proviennent de la démolition et de la disposition des matériaux en fin de vie.

À l'échelle mondiale, la production du ciment représente 5 % des émissions de GES et celle de l'acier 3 à 4 % (Laurent, Boucher, Villeneuve et D'Amours, 2011). Ces matériaux étant très majoritairement utilisés à des fins de construction, on peut estimer que plus de 8 % des émissions de GES mondiales sont dues uniquement à la fabrication des matériaux utilisés dans le bâti.

À l'échelle de l'Amérique du Nord, la Section du Québec du Conseil du bâtiment durable du Canada estimait que 25 à 30 % des émissions globales de GES sont dues à l'utilisation des bâtiments ; c'est-à-dire essentiellement au chauffage et à la climatisation (2013). Par ailleurs, elle estime qu'environ 10 % des émissions de GES globales sont liés à la production des matériaux, à leur transport et à leur mise en place, ainsi qu'à leur démolition et leur fin de vie.

1.2 La maison individuelle

La maison individuelle non attenante, c'est-à-dire les habitations indépendantes n'accueillant qu'un seul foyer, représente moins de la moitié des logements québécois. À contrario, dans l'ensemble du Canada elle correspond à la majorité des logements. (Gouvernement du Canada, 2017)

1.2.1 Un rêve américain

La maison individuelle est un symbole fort représentant la propriété par excellence et, par contagions, la liberté de pouvoir faire ce qu'on veut chez soi. La prospérité des classes moyennes américaines rend l'atteinte de la propriété possible pour le plus grand nombre. Ce faisant, le rêve américain engendre indirectement, dans l'ensemble de l'Amérique du Nord, un étalement urbain majeur. L'éloignement toujours plus important entre les centres urbains et les lieux de résidences est interdépendant du mode de vie actuel et de la relation au transport. En effet, la démocratisation de la voiture a permis un éloignement des classes moyennes des centres-villes. Ce phénomène, outre la ségrégation sociale qu'il engendre, a produit un urbanisme peu organisé et très émetteur de GES. (Ghorra-Gobin, 2013)

En effet, l'augmentation de la surface des villes nécessite la construction de nombreuses infrastructures, non nécessaire auparavant, et l'agrandissement des ouvrages existant. On peut citer en particulier la construction de réseaux routiers toujours plus imposants, ainsi que l'allongement des réseaux d'aqueducs et électrique, et les pertes énergétiques qui en découlent. L'ensemble de ces infrastructures engendre des émissions de GES, durant leur construction et leurs utilisations. (Commission de coopération environnementale [CCE], 2008)

Une thématique souvent associée, à raison, à l'étalement urbain est celle des transports. En effet, l'origine de cet étalement est intrinsèquement liée au développement de l'automobile. Il a donc

naturellement comme conséquence une augmentation majeure de l'usage des transports individuels. De plus, la diminution de la densité de population rend plus difficile la mise en place de systèmes de transport collectif. Cet agrandissement des régions urbanisées provoque donc une hausse importante des émissions de GES, tout en rendant plus complexe la mise en place de pratiques de réduction passant par d'autres modes de transport.

1.2.2 Un domaine en recul

Alors que le nombre de logements construits au Québec est reparti à la hausse en 2017 (+20 % sur un an), après un trou d'air entre 2013 et 2016, atteignant les niveaux de la période 2008-2012, 46 495 logements ont été construits. Cette forte hausse est due exclusivement aux appartements qui représentent plus des trois quarts des nouvelles constructions. Les constructions de maisons individuelles ne profitent guère de ce renouveau du marché et stagne à un niveau faible semblable à celui de 2016, en recul de 40 % par rapport à la période 2008-2012. (CCQ, 2018)

Ce recul advient dans un contexte d'adhésion encore forte des Canadiens au symbole d'indépendance et de liberté que représentent la possession d'un logement et, à fortiori, celle d'un terrain attenant. Néanmoins malgré l'aspiration tenace à ce rêve, venu des États-Unis, plusieurs facteurs sociétaux et économiques expliquent ce retrait. D'une part, l'augmentation des prix de l'immobilier rend son accès plus difficile, en particulier pour le bas de la classe moyenne et les jeunes. D'autre part, l'éloignement des quartiers résidentiels des centres-villes augmente le temps et les coûts de transport et incite à opter pour d'autres types de logements à proximité du lieu de travail. Pour finir, le vieillissement de la population joue aussi un rôle dans ce repli : la dépendance des personnes âgées les pousse à quitter leur maison pour s'installer dans des résidences spécialisées et médicalisées. (Gouvernement du Canada, 2017)

1.3 L'habitation écologique

De plus en plus fréquemment, on entend parler de bâtiments durables, d'écohabitations, de bâtiments certifiés LEED (pour *Leadership in Energy and Environmental Design*) ou encore de maisons écologiques. Mais que sont vraiment ces démarches ? Sont-elles similaires, complémentaires ou bien antinomiques ?

1.3.1 Une multitude de pratiques et de courants

L'apparition dans la sphère publique des enjeux environnementaux, combinés à quelques scandales sanitaires liés aux bâtiments ces dernières décennies, a engendré une préoccupation grandissante des citoyens face aux enjeux sanitaires et environnementaux de leur habitation. Pléthore de courants,

généralement peu ou pas structurés, ont alors vu le jour pour répondre à ces problématiques. Chacun d'entre eux a ses propres orientations : certains priorisent la qualité de vie et l'habitat sain (label « Bâtiments sains ») (Edeis pro, s.d. et Enerj, 2018), d'autres les matériaux ayant une faible énergie grise, c'est-à-dire une faible énergie nécessaire à sa production (Bâti Concept écologique, 2015). Sans oublier ceux focalisés sur la réduction de l'empreinte carbone des maisons (les bâtiments zéro carbone ou « net zéro ») (Conseil du bâtiment durable du Canada [CBDCa], 2016) ou encore ceux visant à optimiser la consommation énergétique et les performances techniques de l'édifice (bâtiment à énergie passive ou positive). Il faut tout de même relativiser l'impact de ces courants : en Amérique du Nord, l'ensemble de ces mouvances ne représentait que 2 % des bâtiments non résidentiels et seulement 0,3 % des résidentiels construits ou rénovés en 2008 (CCE, 2008).

Malgré quelques courants portés sur l'enjeu sanitaire des bâtiments, l'immense majorité est centrée sur la question énergétique et les émissions de GES qui en résultent (CBDCa, 2016). Les questions sociales, en particulier concernant les travailleurs du milieu, ne sont que très peu considérées. Ainsi les conditions d'extractions et de fabrication des matériaux, quand elles sont prises en compte, ne le sont pas du point de vue du travailleur, mais uniquement de celui de l'énergie consommée. Par ailleurs, les impacts des nouvelles constructions sur l'étalement urbain, l'artificialisation des sols, la biodiversité, la pollution lumineuse et sonore, etc. ne sont que rarement pris en considération.

Ces courants ont permis d'accroître la visibilité de certaines bonnes pratiques, mais ont tendance à se focaliser sur une problématique ou un nombre restreint d'indicateurs, ignorant ainsi une partie des impacts des constructions préconisées. Le label LEED en Amérique du Nord (ou ses homologues européens : Haute qualité environnementale et la Méthode d'évaluation des performances environnementales des bâtiments développée par le *Buiding Research Establishment*) apporte une clarification des enjeux environnementaux liés aux bâtiments. Basée sur une analyse multicritère, essayant de prendre en compte le plus large ensemble de problématiques environnementales, cette certification permet de comparer différentes alternatives d'un même projet. Néanmoins, elle est essentiellement destinée à un public de promoteurs immobiliers peu outillés face aux enjeux environnementaux. Elle présente donc pour l'environnementaliste expérimenté de nombreuses imprécisions. En particulier, elle ne permet pas de savoir dans quels domaines il vaut mieux investir les ressources financières, forcément limitées, d'un projet. (Équiterre, 2017)

1.3.2 Critique des pratiques actuelles

Bien que les bâtiments dits « écologiques » ont, en moyenne, une consommation d'énergie de 30 % moindre, des émissions de carbone réduites de 35 %, une consommation d'eau plus faible de 30 à 50 % et des coûts liés aux déchets diminués de 50 à 90 % (CCE, 2008) ; les pratiques actuelles ne sont pas exemptes de lacunes et d'effets pervers nuisant à leurs objectifs.

On entend souvent parler de bâtiments à consommation nulle d'énergie. Généralement, cela veut dire que sur une année ils produisent autant d'énergie qu'ils en consomment, sans aucune prise en compte de l'énergie grise liée à leur construction (CCE, 2008). Autrement dit, ils compensent leur consommation directe sur le réseau électrique en produisant un surplus équivalent à un autre moment de l'année. D'après certaines études, ces bâtiments n'affichent en moyenne une consommation nulle que 75 % des jours et 30 % des heures (Voss, Musall et Lichtmeß, 2011). Cela veut donc dire qu'ils augmentent la demande aux heures de pointe, en particulier en hiver, et augmentent l'offre dans les périodes de creux, là où la demande est faible. Ce faisant, ils considèrent le réseau comme étant un dépôt illimité d'énergie. Le stockage de l'énergie, même à très court terme, à des rendements énergétiques très faibles, de l'ordre de 25 % pour les batteries. En l'état, les bâtiments « net zéro » participent toujours à l'augmentation de la puissance installée par le gestionnaire du réseau électrique, tout en réduisant le facteur de charge de ses installations, c'est-à-dire leur temps de fonctionnement à plein régime. De plus, dans le système québécois le coût marginal de la production électrique est quasiment nul (le coût d'entretien et de main-d'œuvre d'un barrage ne varie pas de manière significative s'il turbine 25 ou 50 % du temps). De ce fait, les bâtiments « net zéro » réduisent les recettes des gestionnaires de barrages (Hydro-Québec pour la majorité) tout en augmentant les coûts en infrastructure, ce qui les incite à revoir leurs prix à la hausse. (CBDCa, 2016 ; Jancovici, 2015)

Les bâtiments dits carboneutres ou neutres en carbone sont également définis comme n'ayant pas besoin d'apports énergétiques entraînant des émissions de GES pour leur fonctionnement (CCE, 2008). Là encore, l'énergie grise et l'ensemble des émissions nécessaires à l'extraction, la production, le transport, l'assemblage et la fin de vie des matériaux ne sont pas pris en compte. Des bâtiments carboneutres peuvent donc avoir une énergie grise supérieure à celle d'un bâtiment classique. Ce faisant, dans des régions où l'électricité est peu émettrice de GES, ils peuvent même s'avérer contreproductifs en ayant un cycle de vie plus émetteur que la moyenne. De plus, on a tendance à considérer que les énergies renouvelables entraînent des émissions négligeables de GES, alors que

plusieurs études ont calculé d'importantes émissions de GES dues à ces énergies, notamment l'hydroélectricité (Astudillo, Vaillancourt, Pineau et Amor, 2017 ; Scherer et Pfister, 2016).

En termes, d'évaluation des impacts environnementaux d'un bâtiment, la certification LEED est un bon indicateur de la qualité d'un bâtiment, qui évite les principaux écueils évoqués précédemment. Elle permet également une valorisation sociale, à travers la notoriété du label, des efforts fournis. Cela représente sûrement un des plus grands avantages du LEED. Sa réputation grandissante et le nombre croissant de projets certifiés participent à la sensibilisation aux problématiques environnementales du bâtiment et favorisent leurs prises en considération politique. Néanmoins, pour estimer précisément les impacts d'un bâtiment et faire des comparaisons fiables entre des scénarios de construction, l'ACV demeure incontournable. On notera là encore les difficultés techniques de ces analyses, et les coûts nécessaires pour parvenir à un haut degré d'exactitude, particulièrement au Québec où les informations sur les matériaux ne sont pas toujours disponibles. (Équiterre, 2017)

1.4 Les matériaux de construction

On définit généralement les matériaux comme étant une substance ou matière « utilisée à la construction des objets, machines, bâtiments, etc. » (Larousse, s.d.). Cette définition, basée sur l'usage très général qu'on fait de la substance et non de ses propriétés intrinsèques, ne permet pas une différenciation entre des matières aussi disparates que le verre et l'acier. Pour préciser cette définition, on peut subdiviser les matériaux en groupe possédant des caractéristiques, et donc des applications, communes.

1.4.1 Les grandes familles de matériaux

Par convention, les sciences des matériaux considèrent trois grandes familles de matériaux distingués par les liaisons chimiques les composants : les métaux, les polymères organiques et les céramiques. Par ailleurs une quatrième catégorie, les matériaux composites, regroupe les différents assemblages constitués d'éléments de plusieurs familles. (K. Beck, note du cours Matériaux, 2016)

Les métaux sont constitués d'atomes liés entre eux par des liaisons métalliques. Cette famille comprend donc les métaux purs, comme le fer ou l'aluminium, mais également les alliages, très utilisés dans le bâtiment, comme l'acier et parfois la fonte ou le laiton. On retrouve les métaux et alliages surtout dans les structures des gratte-ciels et des bâtiments industriels et commerciaux, ainsi que sous forme de matériaux composites dans le béton armé. Dans une moindre mesure, ils sont présents dans l'assemblage des structures ainsi que dans l'ameublement des habitats.

Les matériaux organiques se définissent comme issue à plus ou moins long terme d'une biomasse. Chimiquement, ils sont constitués de chaîne carbonée avec généralement de l'hydrogène et souvent des atomes d'oxygène et d'azote. Dans une moindre mesure, d'autres éléments chimiques (comme le chlore, le soufre, etc.) peuvent être présents. Cette famille regroupe donc les matériaux issus directement des végétaux, notamment le bois, mais aussi l'ensemble des matériaux dérivés de la pétrochimie, comme les plastiques. Dans le bâtiment, leur utilisation a fortement varié au cours de l'histoire. L'industrie du bois est encore très importante au Québec : de nombreux bâtiments sont partiellement structurés en bois notamment pour leur toiture. Certains peuvent également être isolés à partir de végétaux, par exemple du lin ou du chanvre. Les matériaux organiques sont aussi très utilisés dans l'aménagement et l'apparat des bâtiments.

La famille des céramiques inclut l'ensemble des matériaux inorganiques et non métalliques, c'est-à-dire constitués par des liaisons ioniques ou covalentes sans être des chaînes carbonées. Elle regroupe notamment les minéraux, comme le sable, le calcaire ou les différentes formes de roches et les granulats utilisés pour la construction, ainsi que les oxydes métalliques et les verres. Les céramiques sont très présentes dans le bâtiment, surtout dans sa structure, que ce soit pour les maisons en pierres, en briques, ou en béton. Ils sont également présents dans l'isolation avec la laine de verre et de roche.

Les composites se définissent comme un assemblage d'au moins deux matériaux de familles différentes. Ils permettent d'allier les propriétés de deux matériaux pour obtenir un seul matériau ayant les avantages des deux en réduisant leurs inconvénients. Le principal exemple dans le bâtiment est le béton armé : un assemblage de barres d'aciers autour duquel est coulé du béton. Ce matériau allie ainsi la forte résistance à la traction et à la flexion de l'acier à celle à la compression du béton. De plus, la présence du béton protège l'acier contre les altérations extérieures en particulier l'oxydation et donc la formation de rouille qui viendrait altérer ses qualités.

1.4.2 Usages et pratiques actuelles

Les matériaux des différentes familles sont très largement utilisés dans le bâtiment. L'institut de la statistique du Québec estime à près d'un milliard de dollars la valeur commerciale des matériaux de construction produits lors de l'année 2016 (2018a).

Les constructions actuelles utilisent relativement peu les matériaux biosourcés. Alors que ceux-ci étaient couramment utilisés lors de la colonisation du Québec, ils ont depuis été remplacés par des matériaux plus modernes. Cette perte d'attractivité est due à l'évolution technologique et l'apparition d'autres

matériaux structurants, en particulier les bétons et aciers. En effet, les matériaux sont choisis pour leurs propriétés physiques afin de répondre à un rôle spécifique. On peut distinguer trois propriétés principales caractérisant l'utilisation d'un matériau. En premier lieu, son caractère structurel, donc sa capacité à résister aux différentes contraintes mécaniques. En second lieu, ses propriétés isolantes, à la fois acoustiques et thermiques, mais également son étanchéité à l'eau, à l'air et à la vapeur. En dernier lieu, son apparence, c'est-à-dire sa qualité esthétique et sa fonctionnalité pour l'usage quotidien. Ce à quoi on peut rajouter les matériaux utilisés pour le mobilier et l'aménagement des bâtiments.

Concernant les matériaux structurants dans l'habitation individuelle, le plus important demeure le béton armé qui est quasiment omniprésent dans les fondations. De plus, comme la majorité des maisons québécoises comportent des sous-sols, l'ensemble des fondations, du sous-sol et de la dalle du rez-de-chaussée en est généralement constitué.

Pour les parties aériennes de l'habitat, notamment la structure des potentiels étages, trois matériaux sont couramment utilisés. Le béton armé fait partie d'eux, il peut être utilisé à la fois pour les poteaux, les murs porteurs et les dalles des étages, ainsi que pour les toitures plates. Les murs non porteurs étant généralement maçonnes à base de parpaings ou de briques. Une autre possibilité est l'usage d'une ossature en acier, qui remplace alors les poteaux et les dalles de béton. Une telle structure va également être complétée par des murs extérieurs maçonnes. L'acier peut également être utilisé pour l'ossature des toitures à fortes pentes, rôle que ne remplit pas le béton à cause de sa faible résistance à la flexion. Une alternative biosourcée est aussi très utilisée dans la structure des maisons individuelles québécoises : le bois d'œuvre. Utilisable pour les structures des murs et des étages ainsi que pour l'ossature du toit, il offre une alternative économiquement viable aux structures en béton ou en acier pour l'ensemble de la structure hors-sol du bâtiment.

Les matériaux traditionnels utilisés afin d'isoler thermiquement les bâtiments sont généralement d'origine minérale, avec la laine de roche et celle de verre. Cette dernière représente à elle seule plus de la moitié du marché de l'isolation (Gouvernement du Québec, 2002). Ces matériaux sont fabriqués à partir d'un mélange, constitué majoritairement de roches, fondu et vitrifié à très haute température (1600 °C) puis filer pour constituer un isolant fibreux, léger et performant. Plus récemment se sont développés les isolants polymères à base de polystyrène ou de polyuréthane. D'origine pétrochimique, ils possèdent de très bonnes caractéristiques pour l'isolation thermique. Leur moins grand succès que la laine de verre vient de leur coût plus important, de la difficulté à les poser et de leur sensibilité à la chaleur qui peut leur faire perdre toutes leurs qualités isolantes. (Simard, 2009)

L'apparence extérieure des bâtiments doit beaucoup aux matériaux utilisés en revêtements externes. Les plus fréquemment utilisés au Québec sont ceux à base de polychlorure de vinyle (PVC). Étant moulés et teints, ils offrent une très grande variété de texture et de couleurs imitant même d'autres matériaux. Ce qui les rend adaptables à tous les goûts à faible coût. La brique est également très présente dans certaines régions du Québec. Composée d'argile cuite et comportant de grandes cavités d'air, elle offre en plus de son apparence typique des avantages au niveau de l'isolation du bâtiment. Dans une moindre mesure, le bois d'apparat, notamment sous forme de bardeaux, est un matériau biosourcé relativement fréquent sur les façades externes des bâtiments. Il est également utilisé pour le revêtement de certains toits. (Simard, 2009)

Lieu de vie, l'intérieur de l'habitat comporte également des matériaux, en particulier dans les cloisons, ainsi que les revêtements de sol. Les matériaux biosourcés y figurent en bonne place. Par exemple, les revêtements de sols en bois sont extrêmement fréquents, en particulier pour les étages. Les planches, les portes ainsi que leurs châssis sont également très majoritairement composés de bois. De plus le bois est également très présent dans le mobilier. Au final, l'usage du bois dans le secteur résidentiel au Québec est aux deux tiers lié à l'apparence et l'aménagement intérieur et pour seulement un tiers à des éléments structuraux (Centre d'expertise sur la construction commerciale en bois [Cecobois], 2008). On notera tout de même l'importance grandissante des revêtements de sol en PVC, ainsi que l'utilisation importante du plâtre pour les cloisons et les plafonds.

1.4.3 Les matériaux biosourcés

Un des enjeux sous-jacents de la problématique est de définir avec précision ce qui est et n'est pas un matériau biosourcé et de déterminer leurs différents usages potentiels.

On peut définir comme étant biosourcé tout matériau composé, dans son immense majorité, de matière produite directement à partir d'êtres vivants et constitué de chaîne carbonée. Ce qui exclut notamment les matières organiques fossilisées, comme le pétrole, le charbon et le gaz naturel. De plus, les matériaux à base de tourbe ne sont pas considérés non plus comme étant biosourcés, dans la mesure où leur formation se fait sur une échelle de temps géologique et ne constitue donc pas une matière exploitée directement à partir d'être vivant. Par contre, les matériaux à base de produits biosourcés recyclés sont considérés comme étant eux-mêmes biosourcés, par exemple les isolants à base de papier journal.

À l'instar des matériaux traditionnels, on peut les répartir en fonction de leurs propriétés mécaniques, isolantes et esthétiques pour pouvoir les comparer aux matériaux plus conventionnels. Dans le rôle des

fondations et de la structure des sous-sols, les alternatives biosourcées au béton armé sont rares, voire inexistantes. La majorité des projets d'écohabitats utilise le béton pour former une dalle sur sol, évitant ainsi l'installation de sous-sol en nécessitant de grandes quantités (Écohabitation, 2012 ; Vachon, 2018). Le béton utilisé comportera alors souvent des produits recyclés et un ciment à partir de laitier de haut fourneau ou de cendres volantes, mais ne constitue en aucun cas un matériau biosourcé.

Au niveau des matériaux de structure, en plus du bois d'œuvre précédemment évoqué, les bois lamellé-collé et lamellé-cloué possèdent des caractéristiques de résistance aux efforts physiques très intéressantes et peuvent être utilisés comme poutres. Ils offrent davantage de souplesse au niveau de leur structure, pouvant être courbés et former des arcs, là où le bois brut reste nécessairement en section droite. (Cecobois, s.d.)

Les matériaux biosourcés offrent de plus nombreuses alternatives dans l'isolation. L'utilisation la plus traditionnelle des matériaux biosourcés dans ce domaine est l'usage de fibre cellulosique, autrement appelé ouate de cellulose, matière végétale poreuse et donc isolante. Cette fibre inventée au XIX^e siècle est fabriquée à partir de papier journal recyclé. Ses propriétés thermiques sont similaires à celle de la laine de verre, pour un coût plus important (environ double), ce qui rend son usage relativement peu répandu (Simard, 2009). Depuis peu, le secteur de l'isolant végétal se développe et amène sur le marché de nouvelles alternatives aux laines minérales. En particulier, les laines de lin et de chanvres, issues directement de produits agricoles peu valorisés sont mises sous forme de blocs poreux pour former les bétons végétaux. Ces blocs peuvent être maçonnés pour former des murs non porteurs. Ils offrent alors des propriétés isolantes légèrement inférieures à celles de la laine de verre. Une autre alternative, d'origine animale, est l'utilisation de laine de mouton de piètre qualité, issues des bêtes sélectionnées pour leur viande et non pour leur laine. L'utilisation de cette matière première habituellement considérée comme un déchet et peu valorisée permet d'obtenir de bonnes qualités isolantes à des coûts théoriquement plus faibles que la laine de verre. Néanmoins, le peu d'élevages ovins présent au Québec rend cette ressource particulièrement difficile à trouver : elle devra généralement être importée, ce qui augmente considérablement les coûts et réduit l'attractivité de cette alternative. (Dupre, 2014)

Concernant les revêtements extérieurs des maisons individuelles, le bois a déjà été évoqué comme solution courante et peu coûteuse. Une autre alternative, très ancienne qui revient peu à peu à l'ordre du jour est l'utilisation de torchis. Ce matériau composite constitué de terre argileuse et de paille (plus rarement de poils ou de crins) n'est pas à proprement parler un matériau biosourcé : la paille ne représentant qu'une faible part de sa composition. Cependant, sa production de proximité, sa facilité

d'accès et sa très faible énergie grise en font une alternative éco amicale intéressante. D'autant plus qu'il sert à la fois de revêtement extérieur, d'isolant, d'étanchéité et de mur de remplissage sur une matrice en bois. (Michel Dewulf, 2015)

En termes de revêtement intérieur, les matériaux biosourcés occupent déjà une place prépondérante, notamment avec le bois, sous diverses formes. Néanmoins, d'autres solutions existent ici aussi, notamment au niveau du sol et de son revêtement. Une alternative ancestrale, mais toujours d'actualité est l'installation de tapis ou de moquettes issus du monde animal ou végétal, alliant confort, esthétisme et surplus d'isolation au sol. Une autre solution encore très marginale, voire inexistante au Québec, mais utilisée abondamment dans certains pays asiatiques, est l'usage de parquet en bambou. Avec un rendu esthétique similaire à un parquet traditionnel, le bambou offre des avantages environnementaux importants. N'étant pas un arbre, mais une graminée, il stocke 30 % de plus de carbone par kilogramme de matière que le bois et croît plus vite. De ce fait, et malgré la nécessité du transport lié à l'importation, son empreinte carbone est moindre que celle d'un bois local (Lugt, Dobbelsteen et Janssen, 2006).

2. LES MATÉRIAUX BIOSOURCÉS, INTÉRÊTS ET LIMITES

Les matériaux biosourcés présentent des potentiels intéressants pour remplir l'ensemble des fonctions nécessaires à une habitation, en dehors du rôle de fondation. Pourquoi alors ne sont-ils pas plus utilisés ? Quels sont leurs principaux avantages et leurs inconvénients, notamment du point de vue des émissions de GES ?

2.1 Production et accessibilité des ressources

Afin de bâtir des habitations, des composés primaires sont extraits de l'environnement, puis transformés avant d'être transportés et enfin assemblés. Ce processus diffère pour chaque produit, mais l'immense majorité est basée sur un nombre restreint de schémas de production. Ces méthodes industrielles permettant d'obtenir le matériau final ont de nombreux impacts sur l'environnement, en particulier des émissions importantes de GES.

2.1.1 Production primaire

Les matériaux biosourcés sont par définition issus d'une biomasse. La production de cette biomasse a deux grandes origines : l'exploitation forestière et l'agriculture.

L'exploitation forestière est à l'origine de la majorité des alternatives biosourcées en particulier en ce qui concerne les structures ainsi que l'aménagement et l'apparence des lieux de vie. Cette production a la particularité de s'étendre sur un temps très long. Le bois ayant une faible vitesse de croissance, la durée d'un cycle sylvicole complet, est généralement comprise entre 45 et 180 ans (Lippke et al., 2011). De ce fait, on peut distinguer la longue phase de gestion de la forêt, qui sera discutée dans le chapitre 3, et la phase de récolte. Plusieurs méthodes de récolte existent au Québec, certaines forêts se voient ponctionner à intervalle régulier (quelques dizaines d'années) d'une partie de leurs biomasses laissant le couvert végétal globalement en place. En 1999 le film *l'Erreur boréale* (Desjardins et Monderie) dénonçait les coupes rases, surtout dans le Nord québécois, très impactantes pour la biodiversité locale, la régénération des sols et les flux hydriques. Depuis les pratiques ont évolué et sont plus soucieuses de l'environnement. Néanmoins, les coupes totales, appelées coupe avec protection de la régénération et des sols, sont encore très largement effectuées dans le Nord québécois et demeurent plus impactantes que les coupes sélectives (Burgun, 2018 ; Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs [MFFP], s.d. ; Montoro G., Lussier, Morin et Thiffault, 2018).

L'agriculture permet surtout l'obtention de matières nécessaires à la confection des isolants biosourcés, en particulier le chanvre et le lin. Dans les deux cas, il s'agit de cultures annuelles de plein champ demandant une charge de travail similaire à une production céréalière. Ces deux cultures ont des utilisations multiples, les fibres les plus longues sont utilisées pour le textile et les plus courtes pour l'isolation, les graines pour la fabrication d'huile. Les fleurs femelles de chanvre sont également consommées à des fins médicales ou récréatives. Chaque variété étant plus ou moins productive pour chacune des utilisations. D'un point de vue environnemental, les impacts sont comparables aux autres cultures agricoles : ajout de fertilisants (azote, phosphore et potassium) qui peut conduire à l'eutrophisation des cours d'eau ; usage de pesticide ayant des impacts sur la faune et la flore locale ; impact sur les flux de carbones lié au changement d'usage des terres. Ces cultures agricoles à but non alimentaire posent également la question de l'usage des terres et de la dépendance alimentaire à l'importation. (Akpakouma, 2017; Dupre, 2014)

De leurs côtés, les matériaux traditionnels non biosourcés sont très majoritairement issus de l'extraction de matière première du sol. Cette extraction permet d'obtenir les matériaux nécessaires à la production du béton et des isolants minéraux, mais aussi les oxydes métalliques. Dans une moindre mesure, certains matériaux, comme les polymères organiques, sont formés à partir de matière organique fossilisée, en particulier de pétrole.

Dans l'extraction minière, on distingue les carrières, où l'on produit des matériaux rocheux et les mines où l'on cherche à extraire de la roche des solides spécifiques comme les métaux ou les sels (Office québécois de la langue française, 2012). L'immense majorité des matériaux nécessaires à la construction est issue des carrières et est appelée granulats. Il s'agit de morceaux de roches de différentes tailles allant de quelques microns à quelques centimètres. Utilisés surtout pour leurs propriétés mécaniques dans le béton ou pour le terrassement, leur principal intérêt est leur très faible coût. Bien qu'il existe des différences de qualité en fonction de la composition chimique et de la forme des granulats, n'importe quel sol peut être utilisé comme granulats. L'abondance de cette ressource et sa facilité d'extraction expliquent son abordabilité. En effet, il suffit d'enlever la couche organique superficielle, de quelques décimètres à quelques mètres en général, pour avoir accès à la ressource. Au Québec, le prix de ces granulats varie de moins de dix à quelques dizaines de dollars la tonne (Carrière Bernier, 2018 ; Carrière union, 2019). À titre de comparaison, une tonne d'acier vaut près d'un millier de dollars. La quantité importante de granulats nécessaire à la construction d'une habitation (plus de 95 % de la masse d'un béton armé standard vient des granulats le constituant) et le faible coût de la ressource rend l'extraction de proximité primordiale pour éviter des frais de transport exubérants.

De leur côté, les mines fournissent l'oxyde de fer, qui sera par la suite transformé en acier et autres ferrallages. D'autres métaux comme l'aluminium ou le titane sont également issus de l'industrie minière, mais sont marginaux dans l'industrie du bâtiment. Ces oxydes métalliques ne sont présents en concentration importante que dans certains sols. La rareté de ces ressources et le processus d'extraction plus lourd rendent son prix plus élevé. Ce faisant, le cout du transport ne devient plus prépondérant, ce qui rend attractive une importation lointaine.

Par ailleurs, l'extraction minière a des conséquences environnementales importantes au niveau local. Tout d'abord, elle est souvent à ciel ouvert et engendre une destruction totale de la biosphère sur le site. Elle perturbe l'ensemble des régimes hydrographiques, émet des quantités importantes de poussières dans les environs et provoque une pollution sonore importante. De plus, dans certaines circonstances, des effluents, les drainages miniers acides, sont générés et peuvent rendre les eaux locales impropres à la vie (Bouzahzah, 2013).

2.1.2 Les procédés industriels de transformation

Afin de rendre ces matériaux fonctionnels, une ou plusieurs transformations industrielles sont nécessaires. Il existe néanmoins quelques exceptions, généralement liées à des techniques de construction anciennes, par exemple la pierre de taille qui est utilisée directement une fois extraite.

Concernant les matériaux biosourcés, deux grandes familles de procédés sont utilisées en fonction des matériaux primaires. Le bois brut, appelé grume va subir des transformations en scierie. En premier lieu, il s'agit de séparer la partie centrale du tronc, le duramen, des parties extérieures, l'écorce et l'aubier dont les propriétés mécaniques sont peu intéressantes. Par la suite, le bois sera découpé selon l'utilisation finale puis séché. La fabrication de bois lamellé-collé ou cloué sera effectuée à partir de lamelle sèche. L'ensemble de ce processus engendre des pertes importantes, moins de 40 % du matériau initial arrive en fin de chaîne. Les pertes sont néanmoins recyclées, soit pour le chauffage, soit pour des processus industriels comme la fabrication de papier ou de panneau en aggloméré. (Rossi, André et Vallauri, 2015)

Les produits agricoles comme le chanvre et le lin vont également devoir être manufacturés. Tout d'abord, les tiges sont séchées afin d'en faire de la paille qui sera alors décortiquée pour pouvoir en extraire les fibres. Ces dernières seront alors triées selon leurs longueurs. Les plus longues, pouvant être tissées, seront généralement valorisées dans l'industrie textile. Ce sont les fibres courtes qui sont utilisées pour l'isolation. De nombreuses formes d'utilisation sont alors possibles, chacune faisant appel à un processus industriel spécifique nécessitant un séchage en four et, pour certain, l'ajout d'autres

matériaux, en particulier de la chaux. Les produits finis sont diversifiés et vont du béton végétal non porteur, à la laine semi-rigide utilisée pour l'isolation des combles, en passant par les panneaux rigides utilisés en tant que cloisons. (Dupre, 2014)

La confection des matériaux traditionnels nécessite, elle aussi, de complexes procédés industriels. La majorité d'entre eux sont extrêmement énergivores, car il demande de chauffer à très haute température le matériau primaire. Parmi eux, on retrouve les métaux comme l'acier (1650 °C), les isolants minéraux comme la laine de verre (1600 °C) et les liants minéraux comme le ciment de Portland (1450 °C) et la chaux (900 °C). Bien que les processus soient différents pour chaque matériau, ils possèdent de nombreux points communs, notamment concernant le four. À titre d'exemple, l'annexe 1 présente le fonctionnement d'une cimenterie. L'énergie nécessaire est issue principalement d'hydrocarbures fossiles, même si de plus en plus l'usage de déchet est mis en avant par les industriels du secteur (Collet, 2015). En France, la combustion de ces déchets représente 44 % de l'énergie nécessaire au fonctionnement des cimenteries (Infociments, 2018). Néanmoins, que ce soit des déchets ou non, cette combustion de matière organique génère des émissions de CO₂, ainsi que d'autres polluants atmosphériques (monoxyde de carbone, composé soufré volatil, etc.) (Olivier, 2017). De plus, concernant la chaux et le ciment l'objectif du chauffage est de décarbonater le calcaire, réaction chimique qui libère du CO₂.

Il convient également de considérer ici la fabrication d'un matériau courant : le béton. Cette fabrication s'effectue soit directement sur le chantier, soit en amont, dans une centrale à béton. Il va ensuite être acheminé sur place sous forme visqueuse ou déjà moulé et durci : c'est le béton préfabriqué. Ce matériau résulte d'un mélange de ciment, d'eau et de granulats avec potentiellement des adjuvants comme des réducteurs d'eau. Les pourcentages de chacun de ses composants varient en fonction de la qualité du béton souhaité et de son coût : le ratio ciment/eau étant corrélé avec les résistances mécaniques. À titre d'ordre de grandeur, un béton commun va être composé de 75 % de granulats, 15 % de ciments et 10 % d'eau. Chimiquement, la réaction de prise d'un béton vient de l'hydratation du ciment qui forme alors des silicates de calcium hydraté (CSH en notation cimentière) qui servent de liant entre les granulats. Tout au long de leur vie en œuvre, ces CSH vont se carbonater en absorbant du CO₂ de l'air ambiant. Cette réaction est lente et se poursuivra après la valorisation en fin de vie du béton. Néanmoins, à long terme le béton aura absorbé une quantité de dioxyde de carbone similaire à celle émise durant la décarbonatation de son ciment.

2.1.3 Accessibilités et répartition territoriale

L'accessibilité des ressources ainsi que la répartition des lieux de production et de transformation sur le territoire impactent les prix et les émissions de GES, à cause du transport. L'accessibilité d'une main-d'œuvre abondante et de qualité est également un enjeu important.

En ce qui concerne les matériaux traditionnels, leur répartition sur le territoire, du moins sur la partie densément peuplée du Québec, limite les transports. Les carrières et les cimenteries ont tendance à être nombreuses aux abords des métropoles. Par contre, les matériaux à forte valeur, comme les adjuvants et les métaux ne connaissent pas de telles contraintes.

Concernant les matériaux biosourcés, leur mode de production demandant de grands espaces, agricoles ou forestiers, les force à s'éloigner davantage des centres urbains. D'autant plus qu'une partie importante du bois québécois vient de forêt de résineux situé bien au nord du Saint-Laurent.

2.1.4 Le rôle du transport

Une maison individuelle est un ensemble volumineux et pesant. Quels que soient les matériaux choisis, il faudra les acheminer vers le lieu de construction et cela peut s'avérer très coûteux, tant économiquement qu'environnementalement. L'impact du transport dépend de quatre facteurs, la distance à parcourir, le moyen de transport, la masse et le volume des matériaux. Au Québec le fret ferroviaire des marchandises étant développé, les carrières, mines et grandes industries sont reliées au réseau ferré qui les connecte directement aux installations portuaires. Dans la mesure où le transport maritime et ferroviaire sont bien moins dispendieux et impactant que le routier ou l'aérien, cela permet à ces entreprises d'importer et d'exporter des marchandises efficacement.

2.1.5 Bâtir, une opération non sans conséquence

L'acte même de construire diffère selon les matériaux choisis. La quantité et la qualité de la main-d'œuvre nécessaire dépendent du type d'ouvrage. Certains matériaux non conventionnels nécessitent une main-d'œuvre formée à leur mise en place, forcément plus rare et donc potentiellement moins disponible. Par ailleurs, les engins de chantiers et les consommables, c'est-à-dire les éléments utilisés pour la construction à usage unique, par exemple certains coffrages pour béton, dépendent également des matériaux et technologies utilisées.

La main-d'œuvre est primordiale à l'acte de construire et est logiquement adaptée aux méthodes de construction actuelles. De ce fait, vouloir user de matériaux originaux soulève la question de l'adéquation entre les savoir-faire disponibles et ceux nécessaires à ces nouvelles habitations. Comme le

sous-secteur du bâtiment vert ne représente que 2 % des emplois liés à la construction (Groupe de travail sur la main-d'œuvre, 2018), trouver une main-d'œuvre locale qualifiée dans ce domaine semble compliqué en dehors des grandes zones urbaines. Ce manque de main-d'œuvre qualifiée est d'autant plus problématique que la qualité et le soin apporté à la construction sont fondamentaux pour la durabilité du bâtiment.

L'acte de construire génère beaucoup de déchet : 7 % de l'ensemble des déchets issus du bâtiment, incluant sa démolition (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie [ADEME], 2014). Ces déchets sont liés à des pertes lors de la mise en place des matériaux, mais également à des consommables, c'est-à-dire des éléments à usage unique ou limité. C'est le cas des emballages, mais également des coffrages pour béton en bois peu réutilisable et ceux dits « perdus » à usage unique. L'utilisation de matériaux autres que le béton permet donc de réduire considérablement ces déchets de constructions.

2.2 Efficacité énergétique

Comme expliqué dans le chapitre 1, la question de la consommation énergétique tend à être omniprésente et à masquer les autres enjeux liés à l'habitat. Elle reste néanmoins une problématique majeure qui engendre 10,8 % des émissions de GES du Québec (MDDELCC, 2015). Le chauffage demeure, malgré les programmes de rénovations thermiques (Groupe de travail sur la main-d'œuvre, 2018), responsable de 64 % de la consommation énergétique dans le secteur résidentiel (Whitmore et Pineau, 2018).

2.2.1 Chauffage et Isolation

Toute nouvelle construction doit respecter des critères stricts d'isolation afin de limiter sa consommation énergétique (Gouvernement du Québec, s.d.). Les différentes interfaces entre l'intérieur et l'extérieur doivent être isolées et respecter une conductivité thermique maximale. La conductivité thermique d'une paroi est définie comme étant le flux énergétique traversant un mètre carré de paroi soumis à un gradient d'un degré Celsius d'écart. La résistance thermique est l'inverse de la conductivité. De plus, la résistance thermique d'un ensemble multicouche est la somme des résistances de chacune des couches. Similairement, doubler l'épaisseur d'un isolament double sa résistance thermique. De ce fait, même un isolant médiocre peut respecter les normes et atteindre un haut niveau de résistance thermique s'il est appliqué en quantité suffisante.

Comparer les isolants peut se faire par deux approches : soit considérer exclusivement les propriétés intrinsèques de l'isolant, soit comparer des sections de murs, ce qui oblige alors à considérer l'ensemble des éléments de la paroi ; en particulier les potentiels ponts thermiques liés aux éléments transversaux. Les indicateurs vont également varier en fonctions de l'approche. Quand l'on s'intéresse aux qualités des matériaux, la résistance thermique d'un mètre d'isolant sera comparée. Pour les parois, forcément plus complexes, on aura tendance à mesurer, à conductivité égale, l'épaisseur ou le cout de chaque alternative.

Les isolants biosourcés qu'ils soient de lin, de chanvre ou de laine animale ont des conductivités thermiques intrinsèques de l'ordre de $0,04 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ sous forme de panneau isolant et peuvent monter jusqu'à 0,045 pour les bétons végétaux ; de leurs côtés les traditionnelles laines de roches et de verres atteignent de meilleurs résultats : $0,032 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (Dupre, 2014). Pour atteindre une résistance similaire avec des matériaux biosourcés, il faudra donc compter une épaisseur de 25 à 40 % plus importante qu'avec les matériaux traditionnels.

Concernant les comparaisons entre parois extérieures, la littérature regorge d'exemple et chacun pourrait proposer de nouveaux assemblages mixant ingénieusement les matériaux. On se limitera ici à une comparaison entre cinq modèles de parois issue de la même étude (Pittau, Krause, Lumia et Habert, 2018). Ces cinq assemblages répondent à la même norme de conductivité ($0,125 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), ils sont respectivement constitués majoritairement à partir de paille, de lin, de bois, de brique et de béton. En termes d'épaisseur, la paroi en bois se distingue en étant nettement plus étroite : 39 cm, quand les autres font aux alentours de 49 cm, et même 53 pour celle à base de lin. Cette même étude vise à faire un comparatif des impacts climatiques de ces parois, et arrive à la conclusion que les parois en lin et dans une moindre mesure en paille réduisent le réchauffement climatique, alors que celles en béton, brique et bois l'amplifient.

Une des problématiques majeures de l'isolation est la question des ponts thermiques. Dès qu'un élément structurant traverse le revêtement isolant, et arrive en contact avec l'extérieur, cela engendre d'importantes pertes de chaleur. En effet, le caractère conducteur des éléments de structure que sont le béton et à fortiori l'acier engendre un fort flux thermique dès lors qu'ils viennent rompre la continuité de l'isolant. Les principaux ponts thermiques se forment au niveau des planchers qui lors d'une isolation par l'intérieur sont en contact avec la partie extérieure de l'habitation. C'est la raison principale du développement de l'isolation par l'extérieur. Néanmoins à plus petite échelle cette isolation génère elle aussi des ponts thermiques : les matériaux isolants devant être protégés des agressions extérieures, la

mise en place d'un bardage est nécessaire. Ce revêtement extérieur doit alors être fixé à la structure porteuse de l'habitation ce qui oblige l'installation de traverses à travers l'isolant, générant de petits ponts thermiques. (Ciarlo et Lalande, 2008)

L'usage du bois comme matériau structurant réduit considérablement les pertes liées à ces discontinuités de l'isolant. En effet là où le béton a une conductivité de 0,75 et l'acier de 50 $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, le bois se distingue par son caractère relativement isolant. En effet, il possède une conductivité, variant selon les essences, ses traitements et le sens des fibres, aux alentours de 0,1. (Cecobois, s.d. ; Dupre, 2014)

2.2.2 Aération et qualité de l'air

Une question liée à celle de l'isolation et l'efficacité énergétique est celle de la qualité de l'air intérieur et des moyens mis en œuvre pour son renouvellement. Dans la mesure où l'on tend à réduire les circulations d'air et que l'on vit de plus en plus à l'intérieur, l'impact des polluants aériens présent dans nos habitations est de plus en plus important. En effet, les matériaux émettent dans l'air ambiant des particules potentiellement nuisibles à la santé des habitants, notamment les composés organiques volatils (Olivier, 2017). Afin de réduire le risque sanitaire, deux moyens d'action : renouveler fréquemment l'air intérieur et choisir des matériaux peu émetteurs de composés volatils. Bien qu'on ne puisse pas faire de généralité sur l'ensemble des matériaux biosourcés, parmi les courants de pensée à l'origine des écohabitations certains avaient comme objectif premier d'assainir les bâtiments (Edeis pro, s.d. ; Enerj, 2018). De ce fait, les matériaux développés ou redécouverts pour servir d'alternative aux matériaux traditionnels sont généralement plus sains.

Concernant le renouvellement de l'air ambiant, la difficulté est de l'allier avec une recherche de performance thermique, dans la mesure où l'air de remplacement est issu de l'extérieur. À l'heure actuelle, les systèmes les plus efficaces sont des systèmes d'aération mécaniques munis d'un échangeur calorifique. Un tel système, autrement appelé à double flux, permet de réchauffer l'air extérieur « pur » avec la chaleur de l'air vicié sans mélange entre les deux. Ce faisant, il permet de réduire la consommation énergétique de la ventilation, mais cela demeure un poste de perte énergétique importante.

2.3 Durabilité du bâti

Une habitation se doit de durer plusieurs dizaines d'années, il est donc nécessaire que ses composants résistent à l'usure du temps. La rénovation est possible durant la vie d'une habitation et même

fréquente en ce qui concerne les parties non structurantes. Pour pouvoir comparer les impacts des différents matériaux sur l'environnement et plus particulièrement sur le réchauffement climatique, il convient de regarder non pas l'impact en absolu d'un objet, mais l'impact par année de vie. Ainsi un matériau peu impactant à sa production, mais ayant une durée de vie courte ne sera pas forcément une bonne alternative.

2.3.1 Temps de vie des structures

Bien que les maisons soient amenées à être rénovées de temps à temps, les rénovations structurelles sont particulièrement délicates à effectuer et entraînent des coûts très importants. En règle générale, un bâtiment dont la majorité de la structure est dans un état de dégradation avancé va être démolé pour laisser la place à une nouvelle construction. Les rénovations structurelles sont limitées aux cas des monuments et édifices culturels ou religieux ainsi qu'à certains bâtiments industriels. Dans le cas des maisons individuelles, il est très rare de voir des rénovations de structures. Leur durée de vie est donc limitée par la durabilité de ses matériaux structurels (SwissLife, s.d.).

La durée de vie d'un matériau dépend des sollicitations, tant chimique que mécanique qu'il subit et de sa capacité à y faire face. Si l'on compare les trois principaux types de structure déjà évoqués, le béton armé, l'acier et le bois, les principaux risques de détérioration sont variables. Les structures en bois craignent surtout l'humidité qui a deux conséquences majeures : une expansion volumique pouvant impacter les autres éléments de la structure, et un risque de pourrissement réduisant considérablement leur résistance sur le long terme. Mais contrairement à l'idée reçue, elles sont très résistantes contre les incendies, en conservant longtemps leur résistance mécanique au milieu du brasier, ce qui permet d'éviter les risques d'effondrement rapide. (Cecobois, s.d.)

Les structures métalliques, généralement en acier, ont deux principaux risques d'altération. Le premier est la corrosion de l'acier en présence d'eau et d'oxygène, ce qui engendre une transformation chimique de la surface de l'acier en sel, notamment des oxydes. Cela engendre une perte de la résistance mécanique de l'acier et donc de sa durabilité (Techniques de l'ingénieur, 2004). Le second résulte de la sensibilité de l'acier aux importantes variations de chaleur et donc aux incendies. Contrairement au bois, l'acier perd toutes ses caractéristiques mécaniques lors des incendies, ce qui rend extrêmement dangereuse toute intervention dans ces bâtiments même après l'incendie.

Les bétons armés subissent différentes altérations structurelles. Mécaniquement, les pièces en traction vont connaître de nombreuses fissurations liées aux retraits du béton durant et suivant son durcissement. Des épaufrures, donc des éclats de béton qui se détachent, peuvent advenir suite au

gonflement du béton. Cela peut être causé par l'eau et des successions de gel-dégel, ou par la corrosion des armatures qui en augmentant de volume font littéralement exploser le béton de l'intérieur. Bien qu'étant moins sensible au feu que l'acier, le béton armé possède une armature métallique qui risque de perdre toute résistance en cas de pénétration importante de la chaleur dans la structure. Le béton armé est encore trop souvent mal mis en place, notamment avec de trop faibles recouvrements des armatures, ce qui nuit grandement à sa durabilité. (Courard et Bissonnette, 2016)

La figure 2.1 montre l'âge de bâtiments résidentiels et commerciaux du Minnesota au moment de leur démolition en fonction de leur type de structure.

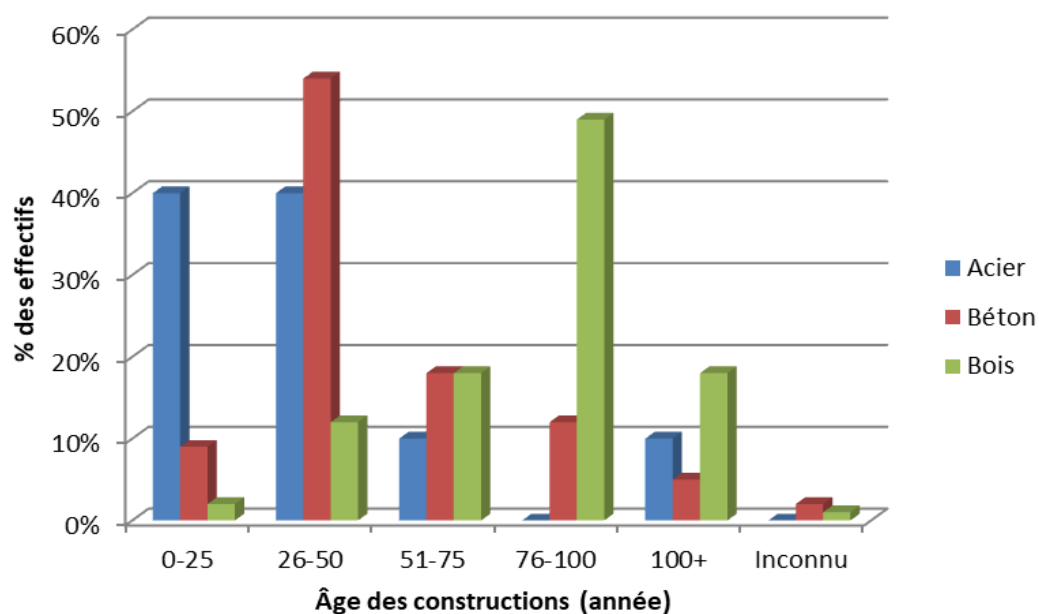


Figure 2.1 Comparaison des âges de destruction des bâtiments suivant le type de structure (tiré de : Athena Sustainable Materials Institute, 2004)

À priori, cela illustrerait une plus grande durabilité des bâtiments en bois. Il faut toutefois amender cette interprétation : le développement massif du béton dans la construction remonte à la deuxième moitié du XX^e siècle. Il est donc logique de ne trouver que très peu de bâtiment en béton de plus de 60 ans. L'acier était déjà utilisé dès la fin du XIX^e siècle, mais il a également connu un essor récent. Par ailleurs, l'étude (Athena Sustainable Materials Institute, 2004) mentionne que dans le cas du béton très peu des destructions sont liées à la qualité de la structure (14 %) alors que cela représente 38 % pour les structures en bois.

2.3.2 Durabilité des isolants

Rénover des isolants de bâtiments est plus simple que de restaurer une structure. Néanmoins, un isolant durable qui conserve ses propriétés physiques sur un temps long est un atout environnemental et économique.

Le caractère poreux des isolants, nécessaire pour avoir une bonne résistance thermique, leur confère deux défauts. D'une part, ils ne sont nécessairement pas étanches à l'eau, et encore moins aux gaz. D'autre part, ils sont particulièrement sensibles aux attaques biologiques comme les moisissures et les champignons, à fortiori quand il s'agit de matériaux organiques comme les biosourcés. Il est donc nécessaire pour les préserver, et avec eux l'air intérieur, de munir leur face extérieure de pare-airs. De plus, comme la majeure partie du temps l'air intérieur est plus chaud que l'air extérieur, il faut prémunir l'isolant contre tout risque de condensation en le protégeant grâce à un film pare-vapeur. Pour assurer ces étanchéités, ce sont généralement des feuilles de polyéthylène ou bien d'aluminium qui sont utilisées. Une alternative biosourcée est l'usage de panneaux de copeaux de bois agglomérés qui peuvent servir de pare-vapeur, mais pas de pare-air. (Bâti Concept écologique, s.d. ; Ciarlo et Lalande, 2008 ; Écohabitation, 2014)

Les bétons végétaux ne sont certes pas porteurs, mais possèdent des résistances mécaniques suffisantes pour supporter leur propre poids et ne pas s'affaisser avec le temps. Cela procure un avantage de durabilité comparativement aux laines en rouleau ou en vrac, qui ont tendance à se tasser avec le temps et donc à perdre en qualité (la résistance thermique décroissant avec l'augmentation de la densité). (Bâti Concept écologique, s.d.)

Les isolants biosourcés, en raison de leur faible densité, ont tendance à être des combustibles très inflammables, ils sont généralement ignifugés pour éviter tout risque de départ de feu. Néanmoins quand ils ne le sont pas, la mise en œuvre doit être plus attentionnée et veiller à ne pas avoir de potentiel déclencheur d'incendie à proximité, comme des câbles électriques (Dupre, 2014).

En conclusion, quel que soit le matériau la durabilité réside avant tout dans les détails de mise en œuvre, en particulier ceux liés à l'étanchéité (Bâti Concept écologique, s.d. ; Ciarlo et Lalande, 2008).

2.4 Fin de vie

Le devenir des différents matériaux, une fois qu'ils ont atteint le stade de déchet est un élément crucial, encore trop souvent négligé lors de la conception des habitations. On appelle déchet tout matériau rendu inutilisable pour ses fonctions originelles. Les bâtiments produisent des déchets à trois moments

de leur vie : la phase de construction en génère 7 %, les travaux de réhabilitation en sont responsables à hauteur de 28 % et la démolition finale du bâtiment à 65 % (ADEME, 2014). La gestion de ces déchets, dont la grande majorité est inerte et donc non dangereuse, peut être catégorisée en trois ensembles. Tout d'abord la réutilisation qui consiste à utiliser à nouveau le matériau en question sans lui faire subir de transformations industrielles supplémentaires. Vient ensuite le recyclage qui consiste à transformer industriellement le déchet pour former un nouveau matériau similaire ou non à celui d'origine. Pour finir, les matériaux qui ne seront ni réutilisés ni recyclés, appelés alors déchets ultimes, seront enfouis ou incinérés.

2.4.1 Potentiels de réutilisation

L'idéal d'un point de vue environnemental et écologique est de pouvoir réutiliser directement les déchets du bâtiment, généralement dans une fonction identique, notamment pour construire de nouvelle habitation. Ce cas ne se présente que pour la démolition finale du bâtiment et s'adresse à des matériaux encore en bon état. Idéalement, une maison n'est détruite que lorsqu'elle n'est plus fiable structurellement et présente des dangers pour ces occupants. De ce fait, la réutilisation ne devrait pouvoir concerner qu'un petit nombre de matériaux spécifiquement durables. Le monde de la construction n'étant pas idéal, de nombreuses maisons sont détruites alors qu'elles sont encore en bon état. Les raisons à cela pouvant être le caractère inadapté de la précédente habitation, un changement d'usage et de valeur du terrain, une densification, ou le coût trop élevé de l'atteinte des nouvelles réglementations (Athena Sustainable Materials Institute, 2004). La réutilisation est une solution encore très marginale, mais qui tend à se développer (ADEME, 2016b). Néanmoins, elle demeure assez complexe à mettre en place dans la mesure où les constructions actuelles ne sont pas pensées pour être démontées facilement ni pour que les matériaux soient facilement séparables les uns des autres. La réutilisation demande donc une grande organisation logistique dans le chantier de déconstruction. De plus, une demande locale de ces matériaux est nécessaire en simultané à la déconstruction. Pour le chantier qui reçoit, la qualité des matériaux de réutilisation n'est jamais connue avec autant de certitude que celle du neuf. Il y a donc un risque plus important sur la durabilité à venir de ces matériaux de réemploi. Améliorer la réutilisabilité de ses composants, tant en pensant la déconstruction qu'en améliorant la durabilité de ses matériaux, est un enjeu majeur auquel font face les constructions écologiques.

Au niveau des matériaux biosourcés, le principal potentiel de réutilisation concerne le bois de charpente lorsqu'il est encore en très bon état. Le bois d'aménagement intérieur, notamment le parquet peut

également être réutilisé, même lors d'une rénovation. Les isolants, en règle générale, ont des durées de vie courte par rapport à celle du bâtiment. Les réutiliser dans d'autres constructions obligerait à des rénovations précoces et donc des surcoûts importants rendant cette option trop désavantageuse.

Les métaux de leur côté sont en théorie assez facilement réutilisable pour les mêmes usages dans la mesure où ils s'altèrent peu si la construction est de qualité. Cela s'applique pour les poutres et poteaux d'acier qui sont des pièces de grande dimension. Mais dans la majorité des maisons, les métaux sont disséminés en petits éléments ou utilisés en armature de béton donc très difficilement récupérable et traçable. Par ailleurs, le maintien de la qualité des éléments oxydables n'est pas assuré durant des travaux de démolition. (Bazed, s.d.)

Concernant les verres, leur grande stabilité chimique permet de les réutiliser pour un usage identique. Mais très peu de cas de réutilisation les concernent (ADEME, 2016b). Cela est peut-être dû à sa fragilité qui rend complexe sa manutention et sa récupération en bon état durant la démolition. Par ailleurs, les filières de recyclages pour les vitres sont en plein développement ce qui peut faire de l'ombre aux pratiques de réemploi direct (id verre, 2004).

Réemployer le béton structurant d'une maison, en particulier ses fondations, peut sembler irréaliste dans la mesure où il forme un seul ensemble cohérent. Cela reviendrait donc à vouloir réutiliser l'ensemble des fondations d'une maison, voir l'ensemble de sa structure, donc concrètement à ne pas la démolir. Cependant dans le cas des bétons préfabriqués, qui sont des pièces de béton fabriquées en usine et acheminées sur le chantier pour y être assemblées au reste de la structure, cela est possible. Étant donné qu'ils possèdent une indépendance vis-à-vis de l'ensemble de l'habitation, il existe des cas de réutilisation directe ne passant pas par du recyclage, mais cela demeure très marginal (Les Architectures, 2009).

2.4.2 Le recyclage, une alternative

Culturellement, le domaine du génie civil n'est pas habitué à la réutilisation directe, mais l'est bien davantage au recyclage. Le but du recyclage est de faire retourner les déchets dans le processus de fabrication et ainsi d'éviter de consommer de nouvelles ressources primaires. Cependant, les altérations subies par ses déchets tout au long de leur vie et le manque de connaissance de leur composition précise font qu'ils sont généralement recyclés en matériaux de moindre qualité.

Un des désavantages des matériaux biosourcés, à l'exception de ceux à base de bois, est qu'ils sont encore trop marginaux pour disposer de filières de recyclage structurées. La plupart des matériaux ayant

été traités pour résister aux attaques biologiques ne sont pas compostables. Le bois, par contre, possède des installations de recyclage où il sera retransformé en matériaux de construction ou bien utilisé dans l'industrie des pâtes et papier, grande consommatrice de matière ligneuse. (ADEME, 2014 ; Cecobois, s.d.)

Les déchets à base de verres possèdent de nombreuses façons d'être recyclé. Ils peuvent être refondus, utilisés une fois broyés dans différents compartiments de la construction allant des routes aux tuiles en passant par certaines peintures, ou encore servir de filtre par exemple pour le traitement des effluents industriels. (id verre, 2004)

Les métaux et alliages récupérés sur les sites de démolitions sont en théorie recyclés selon leurs compositions chimiques. En pratique, de nombreux alliages d'acier possèdent de petites concentrations en divers métaux (nickel, chrome, molybdène, etc.). Généralement, tous les alliages polymétalliques à base d'acier vont être fondus ensemble et utilisés pour la confection de nouvelles pièces en acier, perdant ainsi l'intérêt des métaux à faible teneur qui se retrouve à l'état de trace. (Thibkerview, 2018)

En dehors de son armature, le béton est très fréquemment recyclé en étant concassé à différentes granulométries. Il remplacera alors des granulats naturels, notamment dans les sous-couches routières ou dans un nouveau béton. Étant quasiment inerte, il ne fera que se carbonater avec le temps donc absorbera du CO₂ atmosphérique. Il demeurera totalement inoffensif pour l'environnement.

Le cas du plâtre, composé de gypse, illustre les difficultés à recycler certains matériaux. En effet, il possède de nombreuses applications une fois broyées, mais n'est que très peu recyclé. Il pourrait être utilisé comme amendement agraire, dans les cimenteries où le gypse représente entre 3 et 5 % du ciment, ou même être retransformé en plâtre. Mais le fait qu'il soit généralement mis en place avec une structure en carton crée des risques importants d'impureté dans le plâtre et rend son recyclage marginal. (Recovering, s.d.)

2.4.3 Gestion des déchets ultimes.

Les déchets ultimes sont tous ceux qui ne sont pas réintroduits dans le circuit industriel et qui vont donc devoir être gérés en préservant l'environnement, ce qui n'empêche pas certaines valorisations économiques.

Il existe deux grandes catégories de déchets issus du bâtiment, les matières dangereuses définies par règlement (Gouvernement du Québec, s.d.) et celles qui ne le sont pas. Parmi les dangereuses on retrouve certains bois traités, notamment ceux l'étant au pentachlorophénol, certaines peintures et

l'ensemble des produits contaminés par des hydrocarbures. Ces matières doivent être prises en charge par un établissement canadien spécialisé dans leur gestion, ce qui implique parfois de devoir les transporter jusqu'en Colombie-Britannique. Après traitement chimique, ceux qui sont encore dangereux seront généralement scellés dans du béton et enfouis dans une enceinte contrôlée. (ADEME, 2016a ; J. Laperrière, note du cours ENV788 - Prévention et traitement de la pollution, Automne 2018)

Les déchets non dangereux peuvent connaître deux avenir distincts, le plus fréquemment au Québec ils sont déposés dans un lieu d'enfouissement technique (LET), pour y être stockés. La matière organique qu'elle soit d'origine fossile ou biosourcée va finir par se décomposer en émettant du CO_2 ou du CH_4 , dépendamment du caractère aérobie ou anaérobie de cette dégradation. Le méthane ainsi produit pourra être récupéré et valorisé comme combustible, relâchant ainsi du CO_2 . À terme, le carbone présent dans la matière organique aura été dans son immense majorité transformé en GES et pour une petite quantité intégré durablement, dans le sol superficiel.

Du côté des matériaux traditionnels, les métaux vont finir par s'oxyder et former des oxydes métalliques, formes auxquelles on les trouve généralement dans la lithosphère. Les verres, plâtres et autres céramiques inertes resteront dans leurs états initiaux. Le béton quant à lui se carbonatera au fil du temps en réagissant avec le CO_2 ambiant et donc en le prélevant de l'atmosphère.

Le deuxième avenir possible de ses déchets ultimes est leurs valorisations par combustion. C'est le cas des résidus de bois qui sont mis sous forme de copeaux pour être utilisés comme chauffage industriel ou domestique. Les combustions émettent sous forme de CO_2 le carbone présent dans la matière organique brûlée.

Il est important de mentionner qu'une petite portion des matériaux n'est pas gérée comme des déchets, mais contamine directement l'environnement. C'est le cas en particulier des pertes de matière liées à l'usure et aux émissions de composés volatiles. (Thinkerview, 2018)

3. LE STOCKAGE DU CARBONE

Un des objectifs de cet essai est de prendre en compte le stockage du carbone des matériaux biosourcés dans les ACV. En effet, les matériaux biosourcés sont constitués d'environ 50 % de carbone ; les utiliser dans la construction permet de constituer un stock de carbone et d'empêcher ainsi des émissions de CO₂ de l'ordre d'une tonne par mètre cube de matériaux (Cecobois, s.d. ; Rossi et al., 2015). Le but du présent chapitre est de discuter ce rôle de stockage, non pas en regardant les matériaux de manière individuelle, mais de manière macroscopique, en considérant les cycles de carbone forestier et agricole.

3.1 Principe chimique

Le simple fait qu'un matériau soit constitué de carbone est nécessaire, mais pas suffisant pour faire de son utilisation un moyen de stocker du carbone. Il faut également que l'utilisation en question permette d'éviter l'émission du carbone qu'il contient pendant sa durée de vie. Ainsi certains matériaux organiques comme la tourbe ne peuvent être considérés comme un outil de stockage de carbone car, hors intervention humaine, ils n'émettront pas leur carbone intrinsèque. C'est également le cas pour les roches carbonatées comme le calcaire. C'est donc le caractère biodégradable des matériaux, et indirectement leur capacité à piéger le carbone pendant leur formation, qui sont fondamentaux pour que leurs utilisations soient considérées comme une façon de stocker du carbone.

3.1.1 Photosynthèse et création de biomasses

La biomasse est produite par deux grandes catégories d'être vivant. Les hétérotrophes utilisent une matière organique préexistante pour créer leur propre biomasse et les autotrophes fabriquent leur biomasse uniquement à partir d'éléments inorganiques et minéraux. Dans l'optique du stockage du carbone, ce sont ces derniers qui nous intéressent, car ils fonctionnent comme un puits de carbone, là où les hétérotrophes ne font que déplacer, et réduire, des stocks. Cette captation du carbone nécessite de l'énergie, généralement issue du soleil, on parle alors d'autophototrophies. (Encyclopaedia Universalis, s.d.)

Les matériaux biosourcés utilisés dans la construction sont quasi exclusivement issus de l'autophototrophies, plus précisément de la photosynthèse des végétaux. La figure 3.1 présente la réaction chimique globale et simplifiée menant à leur production. Cette formation de matière organique consomme du dioxyde de carbone gazeux et de l'eau, réduisant ainsi les GES. (Prat et Moreau, 2004)

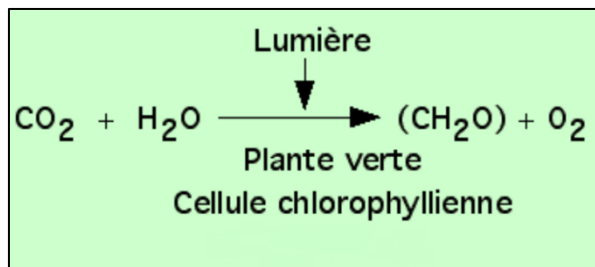


Figure 3.1 Équation bilan de la photosynthèse (tiré de Prat et Moreau, 2004)

3.1.2 Respiration, décomposition et perturbation

L'ensemble de la biomasse produite, notée GPP pour *Gross Primary Production*, n'est pas conservé à long terme sous sa forme initiale. La partie piégée durablement est même extrêmement faible et de l'ordre de quelques pour cent (Watson et al., 2000). Différents mécanismes sont en œuvre pour réémettre ce carbone, généralement sous forme de dioxyde, et se déroulent sur des échelles temporelles et géographiques plus ou moins importantes. La figure 3.2 présente ces différents mécanismes et les quantités de carbones mis en jeu à l'échelle terrestre.

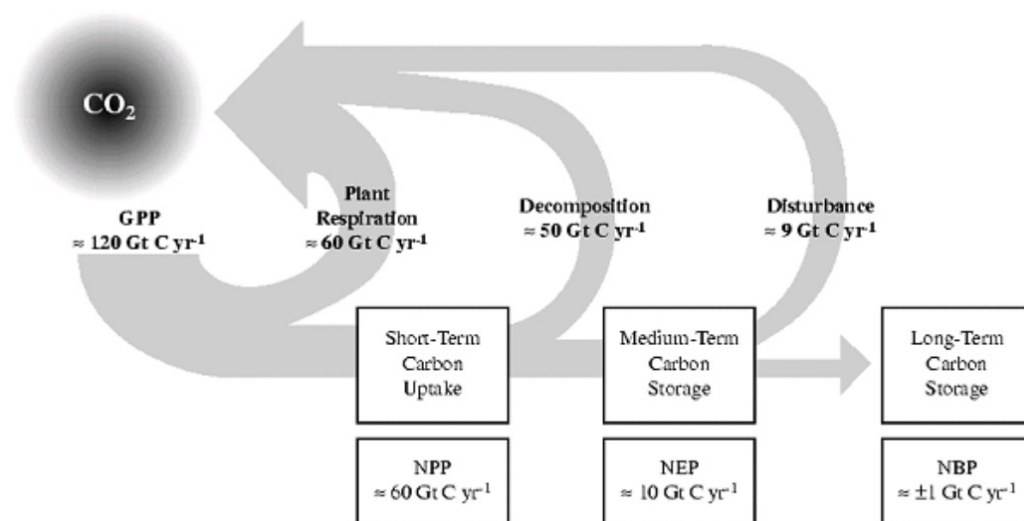


Figure 3.2 Absorption et réémission du carbone terrestre (tiré de Watson et al., 2000)

La première forme de rejet, à très court terme, est la respiration même des organismes autotrophes qui utilisent une partie de la biomasse qu'ils produisent comme source d'énergie pour l'ensemble de leurs activités cellulaires. Ce faisant, ils dégradent près de 50 % de leur production de matière organique et réémettent des quantités importantes de CO₂. La biomasse restante, appelée *Net Primary Production* (NPP) sera stockée à court terme.

À l'échelle d'un écosystème, la croissance de végétaux va de pair avec la décomposition des plus anciens et le développement d'une biomasse hétérotrophe. L'accroissement de la biomasse totale, le *Net Ecosystem Production* (NEP) est de l'ordre de 10 % du GPP. C'est-à-dire qu'à moyen terme, plus de 80 % de la NPP sera décomposée et dégradée par les différents organismes.

À une échelle plus grande encore : celle du biome, le *Net Biome Production* (NBP) est encore plus faible, inférieur à 1 % du GPP. Il comprend, l'ensemble des perturbations que subissent les différents écosystèmes, qu'elles soient anthropiques comme la récolte ou le déboisement, ou naturelles comme les incendies. Le NBP a longtemps été considéré comme nul par hypothèse dans la mesure où, hors intervention humaine, la quantité de biomasses mondiale est censée être stable. La démonstration actuelle de la non-nullité du NBP est une preuve de l'impact passé des actions humaines qui ont diminué le stock de carbone terrestre en deçà de son niveau de stabilité, générant en réponse une augmentation du NBP. (Watson et al., 2000)

3.1.3 Dégradation des matériaux biosourcés

En fin de vie, les matériaux biosourcés, comme l'immense majorité de la biomasse, se dégradent en étant consommés par les organismes locaux. En fonction des conditions du milieu, deux types de dégradation sont possibles.

En condition aérobie, c'est-à-dire en présence de dioxygène libre, le carbone organique va avoir tendance à être oxydé. Cette réaction relativement rapide combine les atomes de carbone avec du dioxygène, formant du dioxyde de carbone (CO_2). En absence de dioxygène libre, ce qui arrive une fois passé les premières strates de sol aéré par les organismes fouisseurs, la matière organique aura tendance à être réduite. C'est-à-dire que le carbone organique va être transformé, dans une réaction relativement lente en méthane (CH_4). Ces deux principaux modes de dégradation et de transformation du carbone organique en carbone gazeux ont des conséquences majeures sur le réchauffement climatique. En effet, l'estimation du potentiel de réchauffement climatique du méthane sur une période de 100 ans est 28 fois plus élevée que celle du CO_2 (GIEC, 2013). (Olivier, 2017)

3.2 Intérêt du stockage du carbone dans la lutte contre les changements climatiques

Les matériaux biosourcés engendrent des stocks de carbone et donc retiennent pour un temps les émissions de GES. Mais ce stock, éphémère, ne constitue jamais qu'un réservoir engendrant de futures émissions à la fin de vie des matériaux. Un gramme de CO_2 émis aujourd'hui ou demain, cela fait-il une réelle différence du point de vue climatique ?

3.2.1 Le forçage radiatif

La principale source d'énergie sur Terre est le Soleil qui représente plus de 99,99 % de l'énergie totale sur notre planète. Les 0,01 % restant étant issus des réactions nucléaires, majoritairement dans le manteau terrestre. Étant donné la température extérieure du soleil, la distance terre-soleil et la dimension de notre planète, l'irradiation solaire moyenne est de l'ordre de 340 W.m^{-2} . C'est-à-dire que chaque mètre carré reçoit en moyenne 340 Joules chaque seconde, avec bien évidemment des fluctuations importantes en fonction du moment de la journée et de la saison. De cette énergie seulement 48 % vont atteindre la surface, le reste étant capté par les différentes strates atmosphériques ou reflétées. Pour être à l'équilibre, le système doit émettre autant d'énergie qu'il en reçoit, sinon son énergie intrinsèque et donc sa température augmentent. Les émissions énergétiques terrestres, à 80 % des rayonnements infrarouges, sont liées directement à la température externe du globe. De ce fait, quand celle-ci augmente, les émissions augmentent en conséquence, ce qui permet un nouvel équilibre, plus chaud, du système. La température du système terre est donc directement liée à la quantité d'énergie solaire qu'il reçoit et à sa capacité à la réémettre. (Lindsey, 2009)

Les GES captent une partie des rayonnements émis par la terre et les renvoient dans sa direction, c'est l'effet de serre. De ce fait, ils participent à réduire les émissions terrestres et donc à maintenir une température élevée sur la surface terrestre. Ce phénomène, causé en premier lieu par la vapeur d'eau, renvoie sur la surface un flux énergétique similaire à l'irradiation solaire, c'est-à-dire de l'ordre de 340 W.m^{-2} . Les émissions anthropiques, en augmentant les concentrations de GES, accroissent donc la partie des radiations renvoyées sur terres, c'est la principale cause du réchauffement climatique. (F. Lafortune, note du cours ENV 815 - GES et changements climatiques, Automne 2018)

D'autres phénomènes d'origine humaine participent à ces modifications du climat. En particulier les aérosols, des particules solides ou liquides en suspension dans l'air, qui réduisent la part de l'irradiation solaire qui parvient au sol et donc tend à faire diminuer la température. Un autre exemple est les changements d'activités des sols qui viennent en moyenne augmenter la réflectivité et renvoie directement une partie du rayonnement incident, réduisant ainsi l'énergie reçue. (Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique, 2017)

Pour quantifier les apports de différentes émissions aux changements climatiques, on utilise la notion de forçage radiatif (FR). Mesuré en W.m^{-2} , il représente la variation de flux énergétique arrivant à la surface. Pour chaque émission de GES, on peut calculer le FR engendré et donc connaître l'impact direct sur la température terrestre. C'est d'ailleurs à travers les FR que sont calculés les potentiels de réchauffement

global (PRG), qui permettent usuellement d'additionner les différents GES et de raisonner en équivalent CO₂.

Le GIEC (2013) estime que le FR total entre la période préindustrielle (1750) et 2011 est de 2,29 W.m⁻², dont 1,68 dû au CO₂ et 0,97 au CH₄. Une partie étant compensée par les autres phénomènes anthropiques. Au total, ce FR représente 0,45 % du flux total arrivant sur la surface. Cela peut sembler négligeable, mais en première approximation, cela correspond, d'après la loi de Stefan-Boltzmann, à une augmentation de température de 1,7 °C.

3.2.2 Des émissions atemporelles ?

Pour des questions de vulgarisations, et de facilité de calcul, l'unité communément utilisée pour quantifier les impacts climatiques est l'équivalent en dioxyde de carbone (CO_{2-eq}) et non le FR. Ainsi les marchés et les différents bilans carbone (et par extension les ACV) utilisent cette notion d'équivalence en CO₂. Par nature, cette unité ne comporte pas de dimension temporelle, contrairement au FR qui représente un flux à un instant donné. De ce fait, les émissions d'aujourd'hui et de demain sont considérées de la même manière. Le bilan en CO_{2-eq} est simplement la somme des émissions à laquelle on retranche la somme des absorptions.

Avec une telle méthode de calcul des émissions, le phénomène de stockage du carbone des matériaux biosourcés n'a aucune conséquence sur le bilan des bâtiments. Néanmoins, certains modèles d'ACV le considèrent, entièrement ou seulement partiellement, comme un puits (Pawelzik et al., 2013). Cela est surtout vrai pour les analyses partielles, *cradle-to-factory gate*, se limitant à la production et aux transports des matériaux. Ce qui est alors cohérent dans la mesure où ils n'incluent pas dans leurs calculs les émissions liées à la dégradation des matériaux biosourcés.

3.2.3 Les changements climatiques, un modèle dynamique

Cette vision atemporelle présente l'avantage d'être facilement utilisable par les organismes et aisément appréhendable par les citoyens. Mais cela se fait au détriment de la qualité scientifique de la démarche, comme le dit le GIEC :

« La concentration en équivalent CO₂ [...] n'implique cependant pas d'équivalence en ce qui concerne les réponses correspondantes du changement climatique ou le forçage futur. Il n'existe en général aucune corrélation entre les émissions en équivalent CO₂ et les concentrations en équivalent CO₂ qui en résultent. » (GIEC, 2014)

En effet, les concentrations équivalentes sont basées sur les calculs des PRG des différents GES comparativement au CO₂. Ce calcul revient à comparer l'intégrale, entre t_0 et t_h , du FR généré par un kilo d'un gaz émis à l'instant t_0 , à celle d'un kilo de CO₂. Le résultat du PRG dépendant donc en premier lieu du gaz analysé, mais également de l'horizon de temps choisi (t_h). Couramment, le calcul repose sur un horizon de 100 ans, mais cela est un choix purement arbitraire où l'on considère que le réchauffement après 100 ans n'est pas un enjeu. (Levasseur, Lesage, Margni, Deschênes et Samson, 2010)

Ce calcul prend donc en compte la durée de vie du gaz considéré dont la concentration diminue en fonction du temps. Comme les gaz n'ont pas tous la même durée de vie moyenne dans l'atmosphère, le choix d'un horizon court augmente considérablement l'impact des gaz à faible durée de vie et, à l'inverse, un horizon lointain les réduit. L'exemple typique est celui du méthane qui possède à l'horizon de 100 ans un PRG de l'ordre de 28, alors qu'à l'horizon de 20 ans son PRG est de 84 (GIEC, 2013). En effet comme le montre la figure 3.3, la concentration du méthane, et donc le FR induit, chute rapidement et fortement et est quasi nul après 100 ans, alors que celle du CO₂ décroît lentement et reste importante même à un horizon de 500 ans.

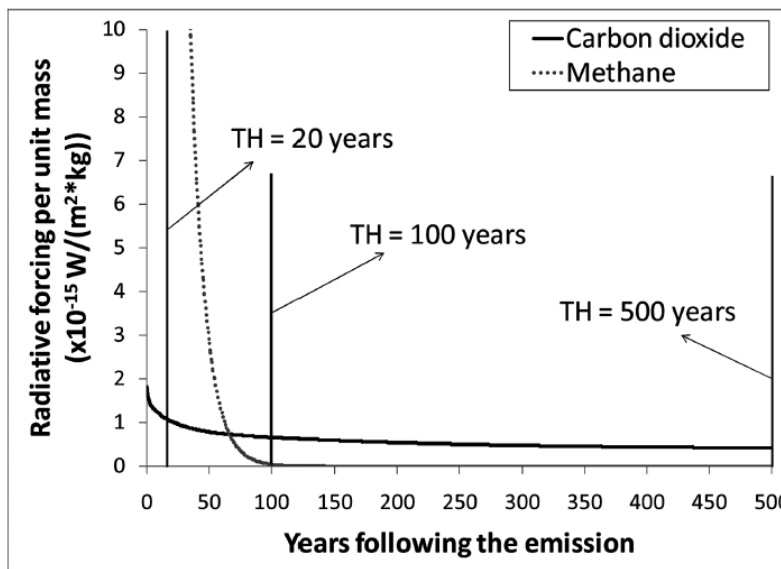


Figure 3.3 Forçage radiatif massique du CH₄ et du CO₂ au cours du temps (tiré de : Levasseur et al., 2010)

Mais intégrer, comme le fait le PRG, l'impact climatique d'un gaz sur un horizon de temps donné fait perdre une partie cruciale de l'information sur les émissions. Dans le cas des GES à très longues durées de vie, supérieur à l'horizon retenu, on néglige totalement les émissions à long terme. De ce fait, les

émetteurs sont incités à préférer ces GES plutôt que d'autres à plus courte durée de vie. Ce qui limite le réchauffement climatique à moyen terme, mais amplifie celui à plus long terme. L'horizon considéré est donc un choix politique qui demande de décider à quelle échelle de temps on veut réduire nos impacts. (Levasseur et al., 2010)

Les GES absorbent près de 80 % des rayonnements infrarouges terrestres. Chaque gaz a un spectre d'absorption variant en fonction de sa constitution chimique et possède des longueurs d'onde d'absorption privilégiées. Comme le décrit la loi de Beer-Lambert, l'absorption est linéaire avec la concentration pour de faibles concentrations, mais tend à plafonner quand celle-ci augmente fortement. Ainsi l'impact climatique d'un GES a tendance à décroître avec l'augmentation de la concentration atmosphérique de ce dernier. Cette variation du FR engendrée par un GES en fonction de sa concentration n'est pas considérée dans les PRG, qui le postulent constant. Pour compenser cela, les PRG sont recalculés régulièrement. Ainsi l'usage des PRG surestime à priori l'impact des émissions futures, comme celles engendrées par les matériaux biosourcés en fin de vie. (Olivier, 2017)

Un autre élément venant dynamiser les modèles climatiques est le temps nécessaire au système pour atteindre un équilibre, en particulier à cause de la présence de boucles de rétroactions, positives et négatives. Ainsi la fonte du pergélisol, les variations d'albédo liées à la fonte des glaciers ou encore les modifications du couvert nuageux liées aux modifications des cycles hydriques interviennent dans les modifications du climat. Ces réponses du système Terre, s'inscrivent sur un temps relativement long et impliquent un décalage temporel entre le FR et l'augmentation de température qui en résulte. Ainsi le GIEC (2013) considère que l'équilibre climatique nécessite plusieurs siècles à FR constant. L'horizon de 2100, souvent mentionné, correspond donc toujours à une période de transition climatique et la température mondiale devrait continuer à augmenter au-delà, même si le FR se stabilisait dès maintenant.

3.2.4 Considération à long terme

Devant le risque sociétal à court et moyen terme, les scientifiques, suivis des décideurs politiques, considèrent généralement un horizon de 100 ans, ou une date butoir en 2100. Ce qui ne correspond pas à une échelle de temps suffisante pour atteindre un équilibre climatique. Cette restriction à notre siècle demeure toutefois un choix politique ambitieux quand la plupart des actions politiques ne dépassent pas le cadre de la décennie.

Les facteurs susmentionnés font des changements climatiques un élément dynamique qui ne peut se simplifier à une atemporalité. Dans la mesure où l'objectif de limitation des changements climatiques s'inscrit dans un horizon de l'ordre du siècle, les bilans d'émissions de GES doivent permettre d'orienter les actions vers une réduction à cet horizon. Ainsi les émissions tardives devraient être considérées en fonction de leur impact total à la même date que les émissions initiales. Par exemple, pour une construction de 2019 l'ensemble de ses émissions devrait être considéré à l'horizon 2119. Ainsi le stockage du carbone, qui réduit le FR d'aujourd'hui mais augmente légèrement celui de demain, aura un bilan positif, dans les ACV.

3.3 Le stock de carbone forestier

Le bois est-il vraiment une ressource carboneutre et un stock de carbone durable ? À l'échelle d'un matériau, cela ne souffre pas de contestation. Le bois pousse à une échelle de temps humaine et est donc une ressource renouvelable et durable. De plus, il piège du carbone durant sa pousse et ne le libère qu'à sa décomposition. Soit. Mais à l'échelle d'un écosystème cela est-il toujours aussi vérifiable ?

3.3.1 Aux origines des matériaux biosourcés, postulat et hypothèse du stockage carbone

Le postulat initial sous-jacent à la considération d'un stockage est celui de la neutralité carbone du bois sur un horizon de temps de la vie d'une maison individuelle. Autrement dit, le prélèvement de biomasse forestière engendre-t-il une augmentation de la production de la forêt ? Si oui, le stock total de carbone, de l'ensemble forêt/matériaux, augmente-t-il suite à la coupe ?

Leturcq (2011) interroge déjà ce côté macroscopique et la pertinence de différencier les émissions d'origines fossiles et celles d'origines biosourcées, réputées carboneutres, à travers le prisme du bois énergie. En effet, l'origine du CO₂ n'a pas d'influence sur le réchauffement climatique, et la coupe du bois n'engendre pas une repousse instantanée. Mais concernant l'usage du bois comme matériau, il faut rajouter à ce raisonnement une dimension temporelle, qui permet aux forêts exploitées de croître à nouveau, et aux concentrations de GES atmosphérique de décroître.

Plusieurs hypothèses doivent ainsi être vérifiées pour pouvoir considérer les produits en bois comme carboneutre et un stock net de carbone :

- Il n'y a pas de changement d'affectation du sol, qui reste forestier.
- Le stock de carbone dans le sol varie peu suite à l'exploitation.

- La quantité de biomasses aériennes dans la forêt après exploitation atteint, durant la durée de vie du produit, une valeur proche de celle qu'elle aurait été sans perturbation anthropique. Ce que l'on peut subdiviser en plusieurs hypothèses :

- Le NEP est important pendant les premières décennies et décroît avec l'âge du peuplement

- Le NEP, hors perturbation humaine, des forêts plus âgées que le cycle sylvicole est nul.

Ces hypothèses dépendent pour nombre d'entre elles des pratiques sylvicoles et de leur capacité à préserver un environnement forestier sain. Mais toute activité sylvicole est impactante, à minima par le fait d'extraire de la biomasse de l'écosystème.

3.3.2 Le stock de carbone forestier

Le stock de carbone forestier est au cœur des hypothèses. Il est composé de deux parties distinctes : d'une part la biomasse dite aérienne, donc les troncs, branches et feuilles des végétaux. De l'autre le sol, notamment l'humus et les premiers horizons organiques, qu'on limite généralement au premier mètre. Parfois associées à l'un ou l'autre groupe, la nécromasse et la litière sont dans un entredeux : de la matière organique aérienne en train d'être décomposée et de retourner au sol. Sur l'ensemble du Canada, l'U.S. Climate Change Science Program (2007) estime le stock de carbone de la biomasse à 14 500 Mt et celui du *Dead organic matter*, incluant donc le sol, la litière et la nécromasse, à 71 300 Mt. La partie organique des sols, qu'on a tendance à négliger, représente donc plus de 80 % du carbone stocké. Cette importance du sol dans le stockage du carbone est constante à travers les biomes forestiers, bien que moins marqué dans les forêts tropicales (50 %) et les forêts tempérées (63 %) que dans les forêts boréales (84 %) très présentes au Canada (GIEC, 2000).

Conventionnellement, on considère que les sols forestiers constituent un stock de carbone stable dans les forêts matures, même en cas de perturbation importante, anthropique ou non. Bien que de telles perturbations réduisent le stock des horizons superficiels, l'équilibre est retrouvé en général après une vingtaine d'années (Buchholz et al., 2014). Il demeure que les évolutions de ces stocks sont mal connues sur le long terme. Le suivi précis des sols ne représentant pas un intérêt fondamental pour la sylviculture, contrairement à celui de la biomasse aérienne, les analyses sont généralement ponctuelles ou sur une courte durée. Cela rend difficilement perceptibles les lentes variations. Néanmoins, une étude (Zhou et al., 2006) sur les forêts âgées de plus de 400 ans du sud de la Chine, note entre 1979 et 2003 une faible, mais non négligeable, augmentation du stock de carbone dans les 20 premiers centimètres de l'ordre de 0,035 % par an, ce qui représente 0,61 t C par hectares et par an.

Le stock aérien, bien que mineur comparativement à celui du sol, est bien mieux connu. Il est généralement admis qu'un mètre cube de bois représente un stock d'une tonne de CO₂ (Leturcq, 2011). Il est toutefois possible d'affiner ce résultat, notamment en distinguant les résineux des feuillus, généralement plus dense. Ainsi en considérant un taux de carbone de 50 % (il varie entre 45 et 55 %) et une densité respective de 0,40 et 0,54 (Rossi et al., 2015), un mètre cube de bois stocke respectivement 0,73 t CO₂ pour les résineux et 0,99 t CO₂ pour les feuillus. Le taux généralement admis d'une tonne par mètre cube se doit donc d'être corrigé pour les résineux.

Pour confirmer les hypothèses de la section précédente, le plus important n'est pas le stock à un instant donné, mais sa variation au cours du temps. Le concept de NEP prend ici une importance capitale.

Les forêts très jeunes, moins de 10 ans, sont des sources de carbones. En effet, durant ces premières années la faible croissance de la biomasse aérienne ne parvient pas à compenser les activités de dégradation biologique des horizons superficiels du sol. Néanmoins, la partie exclusivement aérienne augmente lentement. Par la suite, le NEP augmente fortement pour atteindre un pic, différent selon les essences, généralement entre 30 et 60 ans avant de diminuer lentement. Les forêts tempérées ont globalement un pic plus précoce et un maximum de NEP bien plus important que les forêts boréales : de l'ordre de 4 t C par hectare et par an. (Pregitzer et Euskirchen, 2004)

Les forêts âgées ou matures sont considérées comme des stocks importants de carbone, mais comme insignifiantes en termes de piégeage du carbone. Les modèles de croissance des stocks, simplifiant nécessairement des dynamiques complexes, comme ceux de Pregitzer et Euskirchen (2004), négligent ainsi l'accroissement des stocks des écosystèmes dépassant les deux siècles. Néanmoins, de plus en plus d'études (Carey, Sala, Keane et Callaway, 2001 ; Luyssaert et al., 2008) tendent à démontrer un NEP positif et non négligeable chez ces forêts et pointent une sous-estimation du NPP par les modèles. Luyssaert et al. (2008) estime, chez les forêts de plus de 200 ans, un accroissement net de la biomasse à 0,4 t C par hectare et par an, ainsi qu'une augmentation totale du stock de 2,4 t C, incluant donc l'augmentation de la nécromasse et celui des sols.

3.3.3 Impact des activités sylvicoles

En plus des variations de stock dues à l'évolution des forêts dans le temps, viennent s'ajouter les impacts anthropiques directement liés aux activités sylvicoles, en particulier la coupe.

Différents modes de gestion des exploitations forestières existent, plus ou moins respectueux de leurs environnements, et donc plus ou moins émetteurs de carbone par déstockage. Le but ici n'est pas de

rentrer dans les détails de chaque technique, mais de présenter grossièrement les impacts sur la biomasse et sur l'ensemble du stock forestier.

Deux grandes catégories se distinguent, celle des coupes totales et celle des coupes partielles. Dans le premier cas, il s'agit de couper plus de 90 % des arbres adultes. Historiquement, c'était le cas des coupes à blanc qui ont depuis été remplacées. Généralement, elles l'ont été par des coupes avec protections de la régénération et des sols, qui portent une attention supplémentaire à conserver les jeunes pousses et à ne pas dénuder les sols. C'est également le cas des forêts de semis en futaie régulière où tout le peuplement est unique : une seule espèce et un même âge.

Ces coupes totales engendrent une perte de carbone dans les sols par au moins trois mécanismes. La destruction du couvert forestier augmente la quantité de rayonnement solaire au sol, réchauffant sa surface et accroissant ainsi les activités biologiques de dégradation de la matière organique. Le prélèvement des arbres matures réduit la nécromasse future, et donc le flux de carbone allant vers le sol. Et pour finir, l'utilisation de machinerie, même modérée, fragmente la forêt, dégrade localement les sols et augmente l'érosion et donc la perte de matière organique. Jolivet (2000), mesure sur des populations de conifères, une perte de teneur en carbone d'un tiers dans les sols superficiels dans les 5 ans qui suivent la coupe totale. Par la suite, la teneur en carbone des premiers centimètres revient à son état d'équilibre dans les 20 ans suivant la coupe (Buchholz et al., 2014). Néanmoins, plusieurs études font part d'une perte importante, pouvant aller jusqu'à 50 %, du carbone plus profond (10-45 cm), à long terme après une coupe totale. Mais ces résultats dépendent spécifiquement de la pédologie locale, en particulier de la présence de podzol. Bien que ce sol soit présent au Québec, on ne peut en l'état généraliser cette perte de carbone profond à l'ensemble des systèmes forestiers (Buchholz et al., 2014).

Concernant la biomasse aérienne, en dehors de l'impact direct qui réduit drastiquement le stock en place, les coupes totales laissent derrière elles un peuplement très jeune. Ce faisant, elles n'optimisent pas l'accroissement futur de la biomasse à court terme et constitueront même une source de carbone les premières années. Le NEP des peuplements très jeunes étant négatif.

Les coupes partielles sont généralement liées à un peuplement irrégulier, tant en espèce qu'en âge, ou alors à une volonté politique de maintenir un aspect forestier, par exemple pour des enjeux touristiques. Ces coupes vont donc avoir comme objectifs de couper les plus gros arbres, dépassant une section donnée, et de laisser les autres croître encore quelques années. Le tout en s'assurant un minimum de surface terrières, donc de section d'arbres, de l'ordre de $15\text{m}^2.\text{ha}^{-1}$. Certaines pratiques vont même au-delà en s'obligeant à laisser un certain nombre d'arbres par hectare dépassant le seuil de coupe.

L'objectif est d'ainsi s'assurer le maintien d'un minimum de couvert forestier et donc une moindre perturbation de l'écosystème. (Nunery et Keeton, 2010)

Elles sont globalement moins impactantes pour le stock de carbone, et plus généralement pour l'environnement, car elles conservent des strates intermédiaires arbustives et herbacées. L'avantage majeur de ces pratiques est qu'une fois la coupe passée l'âge moyen du peuplement forestier reste dans la zone intermédiaire à proximité du pic de NEP. De ce fait, elles optimisent la croissance rapide de la biomasse et donc à la fois le potentiel de bois récoltable et le piégeage du carbone (Rossi et al., 2015).

3.3.4 Stock et durée de vie apparente des matériaux ligneux

Néanmoins, en compensation des impacts sur la forêt, les activités sylvicoles produisent des matériaux ligneux et donc des stocks de carbone à travers eux. La question est quelle quantité et pour quelle durée ?

Dans un premier temps, il faut distinguer le volume de biomasse d'un arbre donné et son volume exploitable. En effet pour une masse donnée exploitable, correspondant au tronc et aux grandes branches, la biomasse totale comprend également les feuilles, branches mineures et racines, non utilisées par l'exploitant. Le ratio entre biomasse totale et utile varie en fonction des auteurs, mais demeure autour de 1,5 pour les résineux et 1,6 pour les feuillus (Rossi et al., 2015).

Dans sa thèse, Vallet (2005) développe les différents usages du bois dans la construction et leurs durées de vie moyenne. La figure 3.4 présente le schéma bilan des usages en construction.

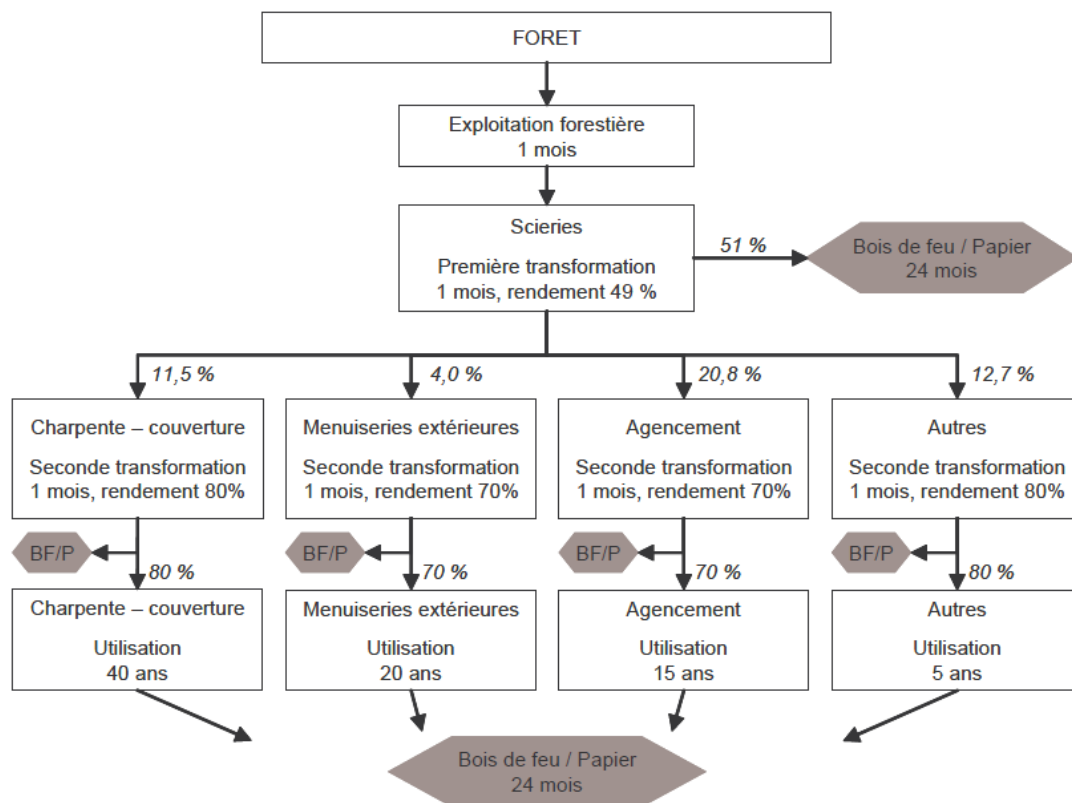


Figure 3.4 Cycle de vie du bois de construction (tiré de Vallet, 2005)

L'élément central qui est ici mis en évidence est l'importance des pertes de bois lors de la première transformation en scierie, ces pertes dépendent des technologies utilisées par les scieries, mais demeurent dans ces ordres de grandeur (Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parc [MRNFP], 2004). Les pourcentages de répartition entre les différentes catégories (Charpente, menuiserie, etc.) sont bien évidemment variables en fonction de la demande. De même, les durées de vie des matériaux sont discutables. En particulier celle de la charpente qui dépend directement de la durée de vie du bâtiment en question. La durée de vie apparente du bois de construction présenté dans la thèse (9,1 ans) variera fortement en fonction de ces variables. (Vallet, 2005)

Il faut tout de même garder à l'esprit que la figure 3.4 présente les durées de vie moyennes actuelles qui tiennent plus à l'utilisation qui est faite des matériaux, que de leur longévité potentielle dans des conditions idéales. En effet, le bois, en particulier en charpente, peut se conserver plusieurs siècles, mais cela demande d'une part un bon entretien, mais surtout une volonté de conserver un bâtiment pendant une si longue durée de temps. Ainsi comme il a été évoqué dans le chapitre 2, seule une minorité des bâtiments sont détruits à cause de problèmes structurels, et quand cela arrive c'est très fréquemment à cause d'une défaillance de la maintenance. La majorité des cas de démolition est liée à une réorientation

de l'utilisation du terrain et à l'inadéquation entre le bâtiment et l'usage attendu (Athena Sustainable Materials Institute, 2004).

3.3.5 Discussion

La première hypothèse, à savoir l'absence de changement d'usage des sols, est généralement valide dans un contexte québécois. La déforestation étant limitée à l'aménagement des zones périurbaines, elle ne représente qu'une part marginale, voire négligeable, de la production québécoise de bois.

La seconde hypothèse concernait l'altération des sols. Plusieurs études montrent un impact majeur des coupes totales à court terme (de l'ordre de 30 % de perte du stock), mais le débat demeure sur les répercussions à l'échelle d'un cycle sylvicole. Par ailleurs, les coupes partielles semblent entraîner une perte moindre du carbone des sols. L'influence du contexte local et la variabilité entre deux sites semblent décisives et responsables de la validité ou non de cette hypothèse. En l'état actuel des connaissances, il n'est donc pas possible de réfuter de manière générale cette hypothèse dans un contexte québécois.

La dernière hypothèse concernant la vitesse de croissance d'une forêt était subdivisée en deux sous interrogations. La première, à savoir la présence d'un maximum du NEP dans les premières décennies et son caractère décroissant par la suite, est vérifiée à ceci près que le NEP d'une forêt d'un peuplement âgé de moins de dix ans est généralement négatif. Mais cela ne remet pas en cause la globalité de cette hypothèse. La seconde concernait la nullité du NEP pour les forêts plus âgées que le cycle sylvicole, et donc le fait que le stock de carbone forestier arrête de croître. Cette hypothèse est réfutée par l'ensemble des études sur les forêts âgées de plus de 200 ans. De plus, là où les cycles sylvicoles dépassent rarement 120 ans, même les modélisations ignorant l'accroissement des forêts bicentennaires, considèrent un NEP non négligeables entre 120 et 200 ans.

La réfutation de cette dernière hypothèse, rend invalide la théorie pensant que l'ensemble du carbone des matériaux biosourcés constitue un stock supplémentaire, car même si leurs durées de vie dépassaient le siècle, ils seraient toujours associés à une perte de stock forestier lié à la diminution de l'âge moyen du peuplement exploité. La question restante est de savoir s'ils constituent partiellement un stock de carbone et, si oui, à quelle hauteur ? Cela revient à se demander si le stock dans les produits bois est supérieur à la perte de stock forestier à long terme. Une façon de répondre à la question est de se demander si une forêt exploitée continuellement à son maximum de rendement engendre un plus grand stockage de carbone dans sa production que celui d'une forêt âgée dans l'ensemble de son écosystème.

Si oui, il faudra concevoir un modèle dynamique intégrant la durée de vie et les variations de NEP des forêts au cours de leur vieillissement. Cela permettra de quantifier précisément la variation du stock entre une forêt exploitée et ses produits et une forêt non exploitée. Et par la suite de calculer les FR engendrés ou évités chaque année et leur somme à un horizon d'une centaine d'années.

Si non, alors la conclusion sera nécessairement l'absence, en tout temps, d'un stockage supplémentaire de carbone dans les matériaux bois. Il sera alors nécessaire de concevoir un modèle similaire pour quantifier le forçage radiatif, jusqu'ici ignoré, engendré par l'exploitation forestière.

Deux valeurs sont nécessaires pour répondre à cette question, la production annuelle maximale de produit bois, destinée à la construction, issue d'un hectare de forêt et donc son stock de carbone équivalent. Ainsi que le NEP d'une forêt âgée, donc le stockage de carbone à long terme d'un hectare forestier.

D'après les données présentées dans le manuel de mise en valeur des forêts privées du Québec (Ministère des Ressources naturelles, 1999), un bon ordre de grandeur de l'optimum de production de bois brute est de $4\text{m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$, pour des forêts mixtes du sud du Québec plus productives que celle du nord. En admettant qu'il s'agisse majoritairement de feuillus, cela représente près de 4 t de CO_2 soit 1,1 tonne de carbone. Parmi elles une grande partie constituera des pertes durant le processus de fabrication des matériaux et ne sera donc pas stockée plus de quelques mois (figure 3.4).

Par ailleurs, la valeur basse observée dans la littérature concernant le NEP d'une forêt âgée est de $1,7\text{ t C}.\text{ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ (Carey et al., 2001 ; Luyssaert et al., 2008 ; Pregitzer et Euskirchen, 2004 ; Zhou et al., 2006).

Ainsi, même en surestimant grandement la productivité de bois de construction et sans prendre en compte la finitude de leur vie, la réponse est négative. Les produits bois ne constituent à aucun moment un stockage supplémentaire de carbone et génère au contraire une diminution globale des stocks. En l'état, chiffrer cette diminution de manière générale est irréaliste tant les variations spatiales sont importantes. Une position conservatrice serait donc de considérer cette diminution comme inquantifiable et par défaut de la négliger. Ce qui revient à considérer le bois comme totalement carboneutre.

Il semble important de préciser que ce résultat ne remet en rien en cause le principe de renouvelabilité d'une forêt bien gérée. Les précédents calculs prennent d'ailleurs comme hypothèse la bonne gestion sylvicole et donc son caractère renouvelable. En absolu, le stock total d'une forêt bien exploité augmente

d'un cycle sylvicole à l'autre. En effet, le stock in situ demeure le même d'un cycle à l'autre, mais un stock en matériaux bois est engendré. Cependant, comparativement à une forêt laissée à elle-même, ce stock total diminue. C'est en ce sens qu'on ne peut considérer l'exploitation forestière comme engendrant un stockage de carbone supplémentaire dans ses matériaux, vu que ne pas l'exploiter en aurait généré un plus important.

Une des questions qu'on peut se poser concerne la pertinence d'étudier ce problème à l'échelle de l'écosystème et non à celui du biome. L'objet de cet essai concerne les choix qui s'offrent à un promoteur dans un projet de construction écoresponsable. Dans cette optique, la demande en bois qu'il peut engendrer correspondra au maximum à quelques centaines de mètres carrés de forêt. C'est donc l'impact marginal de l'exploitation de cette petite parcelle de forêt qui sera celui de sa consommation. Indirectement, son choix est soit d'exploiter cette parcelle pour en obtenir des matériaux, soit de ne pas le faire et de la laisser croître. En ce sens, son impact se limite exclusivement à un écosystème de petite taille et n'impacte pas l'ensemble du biome.

Pour être plus exhaustif, la prise en compte de l'échelle du biome influencerait les résultats par la prise en compte des perturbations de grande envergure, comme les feux ou les épidémies de tordeuse. Ces phénomènes de grande échelle peuvent réduire de manière significative les stocks de carbone in situ. À cause du facteur aléatoire important, anticiper l'évolution des stocks d'un biome exclusivement non exploités devient particulièrement complexe. De plus, aucune valeur précise de NBP n'a été observée dans la littérature, mais uniquement des NEP. En l'état, la meilleure manière de faire serait de diviser le biome en un ensemble d'écosystèmes dont on peut prédire l'évolution, mais cela retomberait sur une analyse à l'échelle de l'écosystème.

3.4 Prise en compte du carbone biosourcé dans les ACV

En l'état, les données disponibles ne permettent pas de valider le concept de stockage de carbone dans les matériaux forestiers. La tendance est même plutôt à l'inverse, les activités sylvicoles diminuent le stock total de carbone même en prenant en compte les matériaux à base de bois, remettant ainsi en cause le principe de neutralité carbone de ses derniers (Nunery et Keeton, 2010). Néanmoins, les matériaux biosourcés ne sont pas tous issus de la foresterie, et pour certains le concept de stockage du carbone peut s'appliquer.

3.4.1 Les matériaux d'origine agricole, un cas particulier

Dans le cas des matériaux issus de l'agriculture, les hypothèses évoquées à la section 3.3.1 sont plus facilement vérifiables. En effet, tant qu'il n'y a pas de déforestation pour augmenter la superficie des sols agricoles, le stock de carbone agricole ne varie pas, ou extrêmement peu. Le chanvre et le lin étant des plantes annuelles, le temps de retour à l'équilibre du stock de carbone est d'un an. De ce fait, l'utilisation des matériaux agricoles constitue un réel stockage supplémentaire de carbone dans le bâti.

Néanmoins, deux enjeux supplémentaires se posent : le changement d'usage des sols nécessaire au développement agricole et la concurrence avec une agriculture alimentaire. Le premier enjeu peut se résumer à la question : si l'on n'exploitait pas ces terres pour faire des biomatériaux, notamment en lin ou en chanvre, seraient-elles destinées à l'agriculture ou bien verraient-elles se développer un autre écosystème, en particulier forestier ? Cette question est capitale en vue de considérer les différents stocks de carbone, car une terre agricole ne représente qu'en moyenne 82 tC.ha^{-1} , là où une forêt boréale en stocke plus de 400 (GIEC, 2000). (Levasseur et al., 2010)

L'enjeu, apparemment plus social, de la vocation ou non alimentaire des terres agricoles, pose l'interrogation du caractère principal, ou non, de la production de ces fibres utilisées dans les matériaux. Autrement dit, l'agriculture mise en place a-t-elle pour vocation première de fabriquer des fibres, ou alors n'est-ce qu'une valorisation d'un sous-produit jusque-là négligé ? Dans le premier cas, cela signifierait une perte de terre destinée à l'alimentation, et donc des problématiques d'accessibilités de la nourriture avec tous les impacts environnementaux que cela peut engendrer. Ou alors, cela entraînerait une déforestation accrue pour pallier au manque de terre arable, on en revient alors à l'enjeu précédent. Dans le second cas, la demande dans les produits alimentaires associés n'ayant pas de raison de croître rapidement, cela induit une quantité limitée de ressources. Ces matériaux biosourcés auront donc vocation à demeurer marginaux et ne pourront prétendre constituer une solution universelle.

3.4.2 Conséquence sur le forçage radiatif de l'habitation

Concernant les matériaux forestiers, la conclusion de ce chapitre est qu'ils ne peuvent être considérés comme un stock de carbone. De plus, la rigueur scientifique nous pousserait à les considérer comme déstockage temporaire, sinon pérenne, de carbone. Ou alors de remettre en question le principe de neutralité carbone du bois, et prendre en compte l'ensemble des émissions forestières indirectes et la dégradation en lui-même du matériau bois, ainsi que son rôle de puits. Cela demande un affinage et un chiffrage précis des différents mécanismes entrant en œuvre, ce qui dépasse la prétention de cet essai et demanderait une recherche spécifique sur cette thématique. De ce fait, le choix retenu, par

défaut, est de continuer à considérer le bois comme carboneutre, mais de ne pas le considérer en plus comme un stock de carbone.

Par contre, dans le cas des matériaux issus de l'agriculture, en particulier à base de chanvre ou de lin, le présent chapitre confirme l'hypothèse qu'il constitue un réel stock de carbone supplémentaire. De ce fait, ils seront considérés pour les ACV du chapitre 4 comme constituant un stock de carbone à hauteur de 45 % de leurs masses (Pittau et al., 2018). La durée de vie des matériaux, et donc celle du stock dépend de leur utilisation et est donc variable. On peut cependant calculer, à partir des courbes de concentration du CO₂, qu'un stockage de 20 ans d'une tonne de CO₂ permet de réduire de 16 % ($1,44 \cdot 10^{-10}$ W.m⁻²) son impact global à un horizon de 100 ans (GIEC, 2013 ; Levasseur et al., 2010).

4. ANALYSE COMPARATIVE

La quantification des impacts climatiques d'une maison individuelle passe par une analyse de son cycle de vie. Le présent chapitre a pour but de quantifier l'importance du stockage du carbone et, plus largement, de prendre en compte les dynamiques d'émissions, puis de comparer des techniques de construction usant de différents matériaux.

4.1 Définitions des scénarios

Pour ce faire, trois scénarios de construction ont été développés, chacun ayant les mêmes propriétés fonctionnelles : surface aux sols, isolations, revêtement extérieur, aménagement intérieur, etc. Le scénario de référence a été développé à partir du modèle d'écoconstruction Maison ERE 132, construite dans les jardins de Métis, qui a été adaptée et parfois simplifiée. Les informations utilisées pour la définition des scénarios sont issues de son site internet (Jardins de Métis, 2014), de l'essai de Nicholas Vachon (2018) et d'une documentation interne fournie par les jardins de Métis.

Un bilan global des matériaux utilisés dans les scénarios est présenté dans l'annexe 2.

4.1.1 Maison ERE 132

Le scénario de référence, appelé Maison ERE 132 comme son modèle, est une construction de 170 m² habitables sur deux étages. Sa surface au sol est un rectangle de 8,3 par 11,7 m, pour une hauteur maximale de 10,7 m. Elle est fondée sur une semelle filante surplombée d'un mur en béton de 60 cm de haut, allant jusqu'au niveau du sol. Son rez-de-chaussée est constitué d'une dalle sur sol en béton de 10 cm d'épaisseur. Au total, c'est 56 tonnes de béton qui sont utilisées à ces fins. L'ensemble du béton utilisé est identique et basé sur un ciment à 15 % de cendre volante et à faible teneur en alcalis.

La structure aérienne de l'habitation est en bois, que ce soit les parties porteuses extérieures ou les quatre poteaux situés à l'intérieur. De même, le plancher et le toit de l'étage, ainsi que les différentes cloisons sont structurés en bois. De plus, les murs extérieurs sont revêtus de clins de pins. Au total, c'est 16 tonnes de bois qui sont nécessaires à la construction de l'ouvrage, soit bien moins que le tonnage de béton utilisé dans les fondations.

L'isolation est la clé d'une maison peu énergivore. Afin de réduire les dépenses de chauffages, la maison ERE 132 est munie d'une isolation importante, allant jusqu'à plus de 600 mm d'épaisseur pour la toiture. Majoritaire, ce sont des isolants en ouates de cellulose qui sont utilisés. Ils sont donc issus des activités forestières. Plus marginale, l'utilisation de polystyrènes expansés isole les parties souterraines, à savoir la dalle sur sol et les murs de fondation. L'isolation totale est bien supérieure aux codes en vigueur et aux

exigences techniques novoclimat 2.0. Ainsi pour la toiture la résistance thermique est de R-82 donc le double de la législation et un tiers de plus que novoclimat 2.0. De même pour les murs hors sol dont le R-48 est le double du code. Les parties en béton au niveau du sol quant à elles respectent juste les exigences de novoclimat 2.0. Au total, c'est 5,3 tonnes d'isolant qui sont utilisées.

En termes d'aménagement intérieur, le rez-de-chaussée comporte un grand espace cuisine/salle à manger, une entrée, une chambre ainsi qu'une salle de bain. L'étage quant à lui est divisé en cinq, avec une grande pièce à vivre, deux chambres, une salle de bain et un local technique. Les cloisons délimitant ces espaces sont constituées de deux plaques de gypse, séparées par une épaisseur de laine de roche, améliorant le confort acoustique.

Du côté de la consommation énergétique, l'évaluation effectuée par écohabitation sur la maison ERE 132, anticipe une consommation totale annuelle de 15 614 kWh. La moitié de cette consommation est liée au chauffage, 18 % au chauffage de l'eau et les 32 % à l'ensemble de l'éclairage et de l'électroménager. Ces valeurs sont conservées dans le scénario dans la mesure où les propriétés thermiques (isolation, ouvertures et inertie) sont identiques et l'utilisation du bâtiment relativement similaire.

4.1.2 Structure béton

Le second scénario, appelé Maison Béton, a pour objectif d'offrir une comparaison entre structures bois et béton dans les écohabitations. Ce scénario n'est donc pas un modèle standard d'habitation individuelle en béton, mais bien une adaptation du scénario de référence mettant en évidence la différence d'impact climatique liée aux matériaux. Ainsi l'isolation de ce scénario est similaire, bien que légèrement plus épaisse dans les murs pour compenser la résistance thermique apportée par le bois structurel, et l'inertie thermique légèrement supérieure, au scénario de référence.

Les fondations, déjà en béton dans le scénario de référence, restent inchangées. Cette hypothèse est discutable dans la mesure où la masse d'une structure en béton est supérieure à une en bois. En effet, l'ensemble du scénario de référence pèse 91 tonnes, alors que le scénario en béton monte à 246. Néanmoins, la contrainte au sol reste relativement faible, 12 et 32 kPa respectivement, ce qui demeure acceptable pour la majorité des sols à faible portance. Il convient de toute manière pour toute construction d'adapter ses fondations à la portance des sols.

Le principal changement concerne la structure portante aérienne. Elle est constituée de 3 rangés de 4 poteaux, chacune d'elles reliés par une poutre à chaque étage portant le plancher et le plafond de

l'étage. Les murs extérieurs, non porteurs, sont constitués de bloc de béton maçonné de 20 cm d'épaisseur. Au total, c'est 210 tonnes de béton et liant hydraulique qui sont nécessaires, soit près de quatre fois plus que pour le scénario de référence.

L'aménagement intérieur reste identique, tant dans la composition des cloisons que dans l'aménagement des pièces. L'isolation étant similaire, la demande en chauffage et en énergie ne varie pas. Cette hypothèse est également discutable dans la mesure où l'augmentation de l'inertie devrait réduire légèrement la demande énergétique. Réduction que l'on considèrera comme négligeable et de toute manière difficilement quantifiable.

4.1.3 Isolation d'origine agricole

Le troisième scénario, appelé Maison Biosourcée, également basé sur celui de référence, a pour vocation de pouvoir intégrer le stockage du carbone biosourcé, et donc de quantifier l'impact de l'usage de ces matériaux dans les écohabitations. La conclusion du chapitre précédent étant que seuls les matériaux issus de l'agriculture peuvent être considérés comme un stock supplémentaire, ils sont massivement présents dans l'isolation de ce scénario.

Ce scénario est similaire en tout point avec le scénario de référence pour les fondations, la structure aérienne, l'aménagement intérieur, la consommation énergétique, etc. La seule différence concerne les matériaux isolants qui sont remplacés par de la chènevotte de chanvre, un matériau isolant ligneux issu du cœur de la tige du chanvre. Ses propriétés isolantes sont inférieures à celle de l'ouate de cellulose ou du polystyrène expansé (Parc Eco Habitat, 2011), ce qui demande une épaisseur accrue (de 20 % à 30 %) pour atteindre les mêmes résistances thermiques. De plus, la chènevotte est un isolant assez dense avec une masse volumique d'environ 100 kg.m^{-3} (Conseil Architecture Urbanisme Environnement, s.d. ; Vegetal(e), s.d.), ce qui est près du quadruple de celle de l'ouate de cellulose. Ainsi la masse d'isolant nécessaire est bien plus importante : 21,9 tonnes contre 4,7 pour le scénario de référence.

4.2 Méthodologie

Afin de comparer l'impact climatique de ces trois scénarios, il convient de définir des critères précis et mesurables et d'avoir une méthode pour les quantifier. Autrement dit, que veut-on comparer ? Et comment ?

4.2.1 Les trois niveaux d'analyse

Cette comparaison à deux objectifs : quantifier les avantages des structures en bois et ceux des matériaux biosourcés stockeurs de carbone. Pour ce faire, trois niveaux d'analyse vont être distingués.

Le premier est un bilan carbonique classique en équivalent carbone calculé à un horizon de 100 ans par un outil d'ACV. Ce bilan sera effectué pour chacun des trois scénarios, en distinguant les émissions de chaque étape. À ce niveau-là, les matériaux biosourcés seront considérés comme carboneutres, c'est-à-dire que leur carbone intrinsèque n'apparaît aucunement dans les résultats. Et ce, que ce soit des matériaux forestiers ou agricoles.

Comme expliqué dans le chapitre précédent, la temporalité des émissions est importante à prendre en compte, et le mécanisme de stockage du carbone ne peut apparaître que dans une approche dynamique. Le deuxième niveau intègre cette dynamique dans les résultats. Concrètement, il s'agit de regarder non pas la somme des émissions en équivalent CO₂, mais le FR engendré au cours du temps. Pour ce faire, il faut regarder non pas les émissions en absolu, mais la variation de concentration de GES dans l'atmosphère induite par l'habitation. Ainsi en l'année 0, seules les émissions liées à la production, aux transformations, aux transports et à l'assemblage des matériaux seront prises en compte. À l'année 1, on ajoutera à cela les émissions d'usage de l'habitation, en particulier celles liées à la consommation énergétique. Mais il faudra y soustraire une partie des émissions de l'année 0 qui ont quitté le réservoir atmosphérique. Pour quantifier cette diminution, on se basera sur les facteurs de concentration en CO₂ en fonction du temps défini par la fonction suivante (Figure 4.1) :

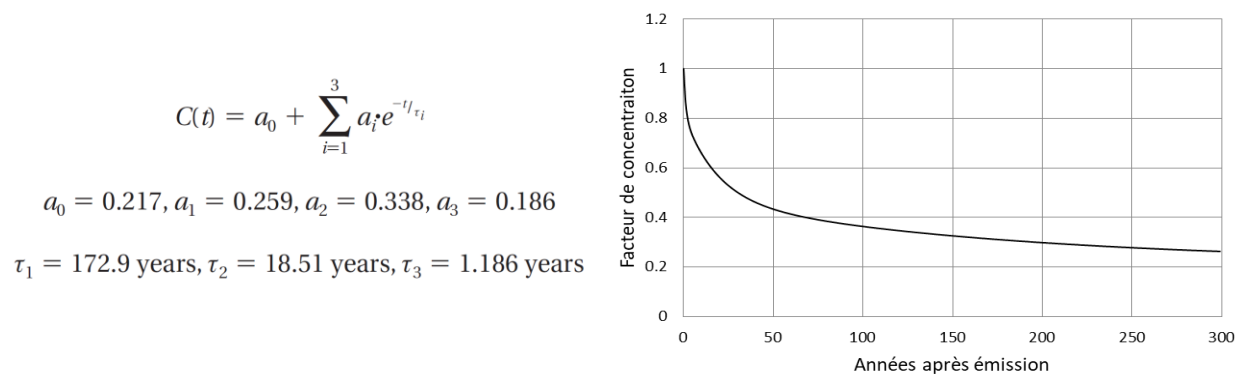


Figure 4.1 Équation et graphique du facteur de concentration du CO₂ en fonction du temps (tiré de : Levasseur et al., 2010)

On pourra alors intégrer le FR ainsi calculé sur l'horizon de temps fixe retenu : 100 ans suite à la construction. Puis à partir de là reconvertir ce FR total en CO₂ équivalent émis au temps initial. Les

valeurs d'efficacité radiative, permettant de convertir les concentrations en FR, et réciproquement, sont issues des éléments scientifiques du cinquième rapport du GIEC (2013).

Les pourcentages de réduction appliquée en fonction de l'année d'émission sont présentés dans la figure 4.2. Cette dernière inclut également, à titre comparatif, les fonctions utilisées par les méthodes PAS 2050 et celle de l'ILDC *Handbook* basées toutes deux sur le principe du 1 % de réduction par an (Pawelzik et al., 2013). La première réflexion à la vision des courbes est que la correction entraînée par la présente méthode est faible, vu que la différence de réduction ne dépasse guère les 10 %. Mais ces 10 % sont importants pour les émissions tardives. Par exemple pour des émissions datées de l'année 60, le passage de 40 % de GES rémanents à 50 % représente un quart de différence, ce qui est loin d'être négligeable.

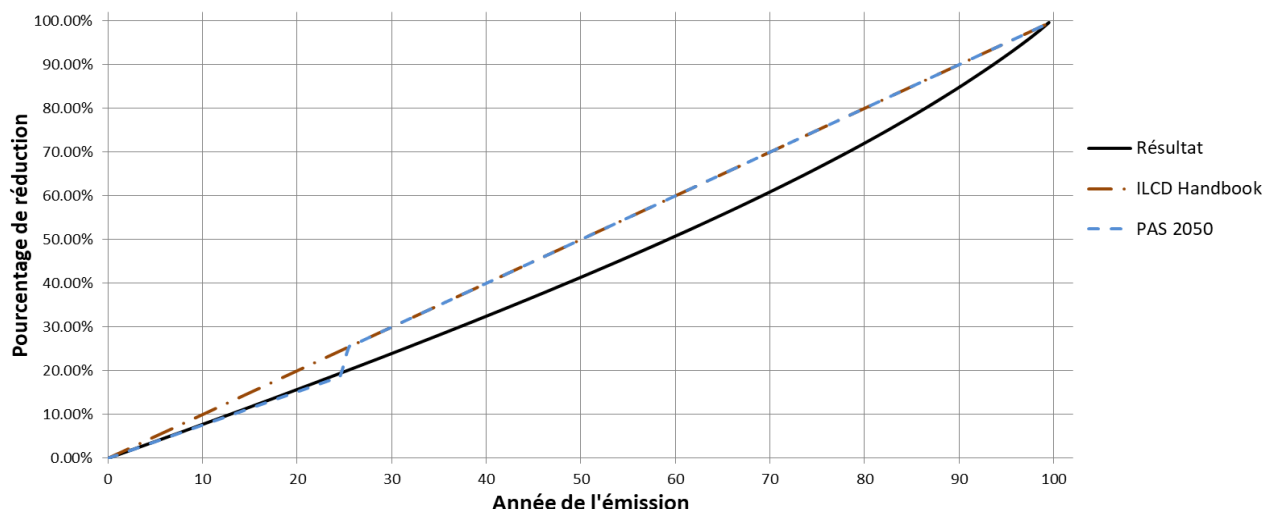


Figure 4.2 Pourcentage de réduction des émissions en fonction de l'année de l'émission (tiré de : Pawelzik et al., 2013)

La méthode développée engendre une légère erreur due au fait qu'elle se base sur un bilan carbone en équivalent CO₂, issue du niveau 1. Pour l'affiner, il faudrait discriminer les différents GES et appliquer à chacun ses propres facteurs de concentration et d'efficacité radiative. Cette erreur demeure marginale en l'absence d'émissions tardives de méthane qui seraient alors sous-évaluées de près de moitié.

Le troisième niveau a pour vocation d'intégrer le mécanisme de stockage du carbone. Cela ne peut s'appliquer qu'au troisième scénario, le seul à engendrer un stock. Il s'agit ici de soustraire aux émissions de l'année 0 la quantité de carbone stocké et de la rajouter aux émissions correspondant à la fin de vie de la construction. Pour déterminer la quantité de carbone stocké, il suffit de connaître la quantité de matériaux stockeurs et leur concentration en carbone. La chènevotte de chanvre, seul matériau

stockeur, est constituée de 50 % de carbone comme la moyenne des matériaux ligneux (Arrigoni et al., 2017). Comme elle est utilisée à hauteur de 22 tonnes dans le troisième scénario, cela représente un stock de 11 tonnes de carbone soit 40 tonnes de CO₂.

4.2.2 Choix et détail de l'outil d'ACV

Le principe de l'ACV est de décomposer une structure complexe en une somme de matériaux et de consommables. Puis d'aller puiser dans les banques de données et la littérature les impacts de chacun de ces éléments pour les rassembler et former une ACV globale de la structure.

Pour réaliser ces deux étapes, deux solutions sont possibles : utiliser un outil auquel on décrit la structure, et qui se charge de la décomposer et d'agréger les impacts. Ou bien décomposer soi-même la structure en éléments simples. Puis calculer le bilan à partir des banques de données. La première méthode offre l'avantage d'être apparemment facilement accessible et plus rapide. Néanmoins, elle demeure limitée dans sa précision, et demande tout de même, une connaissance technique du sujet d'étude. De plus, les banques de données intégrées à ce genre d'outil sont forcément limitées et l'ajout de données tierces issues de la littérature peut s'avérer délicat.

La seconde option, bien plus précise et exhaustive, tant elle permet de détailler la structure réelle, s'avère plus difficile à mettre en place. En premier lieu, elle demande une connaissance précise de l'ensemble des matériaux utilisés et des distances de transport, en particulier entre les maillons de la chaîne de production. Cela peut déjà devenir un casse-tête pour le promoteur dès qu'il s'agit de matériaux complexes ayant des origines multiples. Elle demande également une connaissance technique extrêmement importante du bâtiment pour pouvoir décomposer fidèlement l'ensemble des éléments. C'est d'autant plus le cas pour une étude basée sur des scénarios, forcément moins détaillés qu'un projet réel.

Comme l'objectif de cet essai n'est pas la précision et la rigueur des ACV, mais d'offrir des comparaisons fiables entre les scénarios et compte tenu des contraintes temporelles, l'usage d'un outil a été retenu pour permettre l'atteinte des résultats escomptés.

Afin de choisir l'outil d'ACV utilisé, la définition de quelques critères a été nécessaire. Tout d'abord, l'outil doit être applicable au Québec, donc avoir des données internationales ou mieux encore être spécifique à la région. En particulier, il faut que le mix énergétique considéré puisse être celui du Québec. Il doit également être adapté à l'analyse des bâtiments donc avoir une solide base de données sur les matériaux et pouvoir intégrer facilement des structures. Un point clé pour permettre le

traitement des données est qu'il soit possible de distinguer les émissions en fonction du moment où elles ont lieu. Pour finir, l'outil choisi doit également être accessible donc idéalement en libre-service ou en *open source* et être facile à prendre en main tout en ne nécessitant pas trop de puissance de calcul pour fonctionner.

Comme les contraintes temporelles ne permettaient pas de tester l'ensemble des logiciels, le choix s'est basé sur la littérature, en particulier sur la comparaison effectuée par Sandanayake, Zhang et Setunge (2019), dont le récapitulatif est présenté dans l'annexe 3. Sur les 6 logiciels considérés par l'étude, seulement 4 sont applicables au contexte québécois, SimaPro, Gabi, BEES et Athena. Parmi eux seuls, BEES et Athena sont spécifiquement conçus pour l'analyse de bâtiment. Par ailleurs, l'étude pointe les lacunes de BEES qui présente de nombreuses incertitudes dans ses banques de données et ne permet pas de développer des scénarios de construction précis. En plus des 6 logiciels présentés dans l'étude, le logiciel suisse ECO-BAT a été considéré, mais le manque de clarté sur l'origine des données et la difficulté de prise en main l'ont écarté.

Le choix s'est donc porté sur l'Athena Estimator for Building développé par l'Athena Sustainable Materials Institute (2018). En effet cet outil, est spécifiquement développé pour l'Amérique du Nord et en particulier le Canada. Il présente la qualité d'intégrer les propriétés régionales des matériaux, et estime les distances de transport en fonction de la localisation de la construction. De plus, il utilise directement le mix énergétique québécois, pour sa quantification des impacts dus à la consommation électrique. Cela le rend donc plus fiable et représentatif de la réalité canadienne et québécoise. Il offre également l'intérêt d'être accessible librement, mais n'est pas considéré comme étant particulièrement facile à prendre en main. À l'usage, il s'est révélé plutôt simple à utiliser, mais son principal défaut aura été sa demande en puissance de calcul. (Sandanayake, Zhang et Setunge, 2019)

Une fois l'outil déterminé, il reste à définir un paramètre très important, la durée de vie du bâtiment. Cela impacte également très fortement le rapport entre le bilan carbone des matériaux et celui d'usage de la maison : plus la durée de vie est longue, plus la part de l'énergie consommée augmente. Étant donné que l'âge moyen des logements au Québec est d'environ 37 ans (Institut de la statistique du Québec, 2009) et la volonté des écohabitations d'être durable, la durée de vie a été assumée au maximum proposé par l'outil, à savoir 60 ans.

Un des défauts de l'outil est l'absence des matériaux issus de l'agriculture dans sa banque de données. Les impacts de la chènevotte de chanvre du troisième scénario ont donc été rajoutés par-dessus les résultats de l'ACV initiale. L'impact de ce matériau a été directement tiré de la littérature (Arrigoni et al.,

2017 ; Prétot, Collet et Garnier, 2013 ; Zampori, Dotelli et Vernelli, 2013). Les valeurs retenues sont des émissions de CO₂ à hauteur de 15,6 % de la masse utilisée, générée pendant la phase de production, soit 3,42 tonnes de CO₂ supplémentaire pour ce scénario. On notera au passage que cette émission est infiniment moindre que le stock généré : 183 % de la masse soit 40 tonnes au total.

4.3 Résultats

Les résultats obtenus se présentent sous forme de diagramme pour les bilans carbone et sous forme de courbe pour les forçages radiatifs. Pour chaque résultat sont présentées les valeurs prenant en compte la consommation énergétique d'usage sur la gauche, et celles l'excluant sur la droite. Cela afin de mieux distinguer l'impact du choix des matériaux. Les tableaux de résultat sont présents dans l'annexe 4.

4.3.1 Le bilan en équivalent carbone

Les bilans carbone classiques en sortie d'ACV, après rajout de l'impact de la chènevotte de chanvre, des trois scénarios sont présentés dans la figure 4.2. Ils sont divisés en fonction des grandes étapes de vie des bâtiments, à savoir la production des matériaux, qui inclut ici les transformations et les transports associés ; la construction, qui inclut les transports entre le site final de production et le chantier ; l'usage qui inclut les rénovations et la consommation énergétique ; et pour finir la fin de vie, sans prise en compte des potentielles valorisations des déchets.

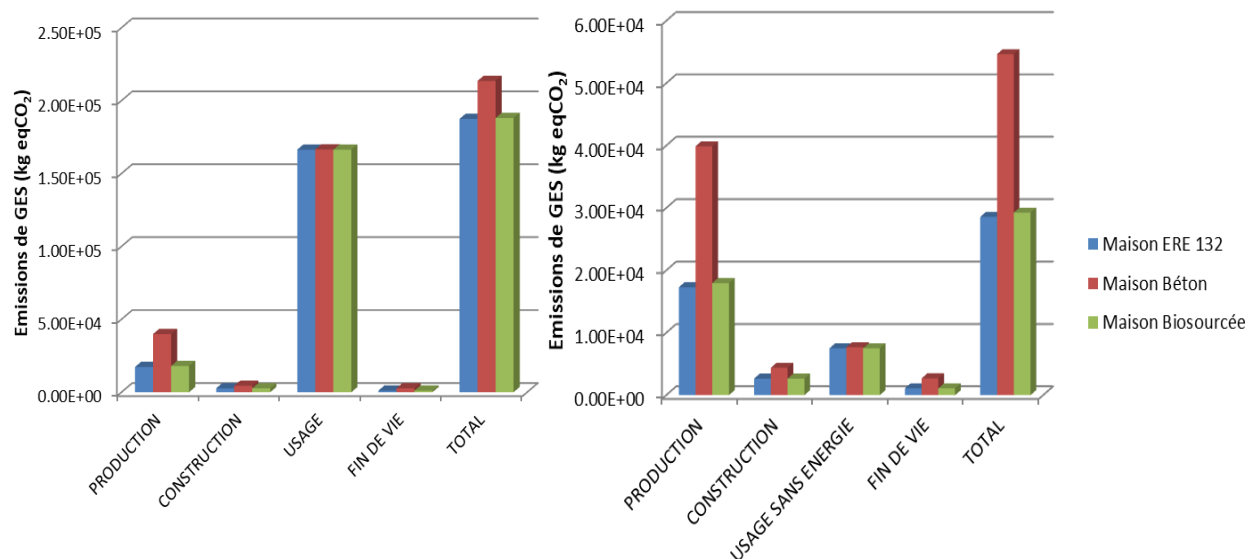


Figure 4.3 Bilan carbone classique

Quel que soit le scénario observé, l'énergie, et plus précisément l'électricité, consommée pendant les 60 années de vie est très largement majoritaire dans le bilan carbone total (entre 75 et 85 %). Cela même

alors que le calcul est basé sur le mix électrique québécois, quasi exclusivement hydroélectrique, qui, comme mentionné dans le chapitre 1, demeure un émetteur important de GES.

4.3.2 Dynamisme et forçage radiatif

Afin de prendre en compte la date d'émissions et par la suite le stockage de carbone, il faut passer par les variations de FR. La figure 4.3 présente ces variations en intégrant ou en excluant la consommation énergétique.

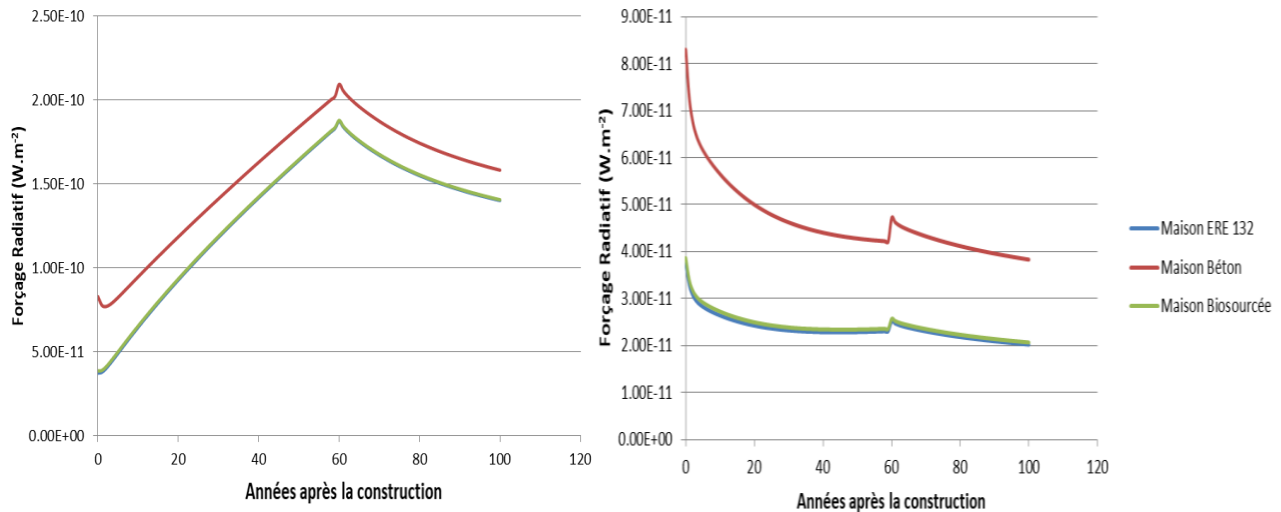


Figure 4.4 Variations des forçages radiatifs

On notera que les forçages radiatifs engendrés par le premier et le troisième scénario sont quasiment identiques et tendent à se confondre. À partir de ces FR, on obtient le bilan carbone corrigé, en $\text{CO}_2\text{-eq}$ émis à la construction, présentée dans la figure 4.4.

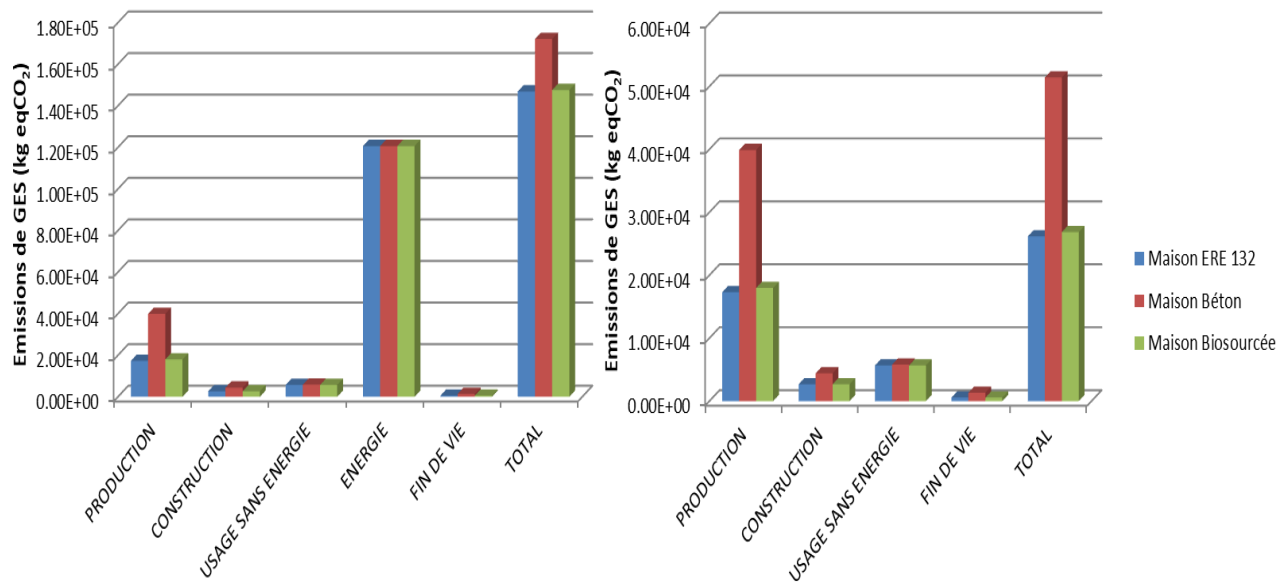


Figure 4.5 Bilan carbone corrigé

La considération de l'aspect dynamique des émissions réduit le bilan carbone de 19 à 22 % quand l'on prend en compte l'énergie d'usage, et de seulement 6 à 8 % quand on l'exclut.

4.3.3 Stockage du carbone

À partir de la méthode du forçage radiatif, il est possible de quantifier l'impact du stockage du carbone par le matériau biosourcé d'origine agricole qu'est la chènevotte de chanvre. Ce faisant on obtient pour le troisième scénario de nouvelles variations du FR présenté par la figure 4.5, ainsi que les bilans carbone, en $\text{CO}_2\text{-eq}$ émis à la construction (figure 4.6).

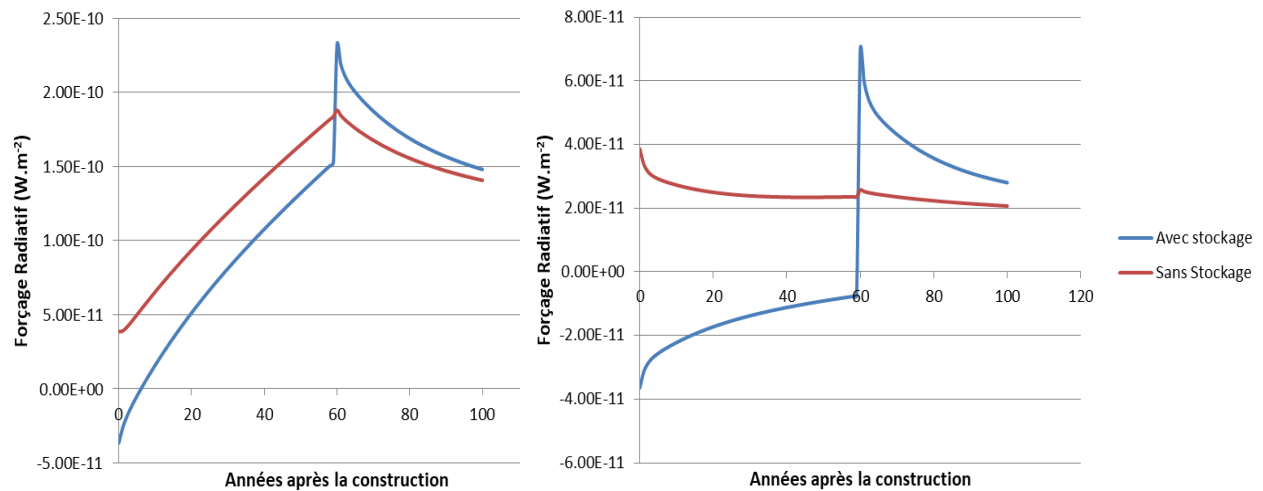


Figure 4.6 Variations des forçages radiatifs avec et sans prise en compte du stockage du carbone

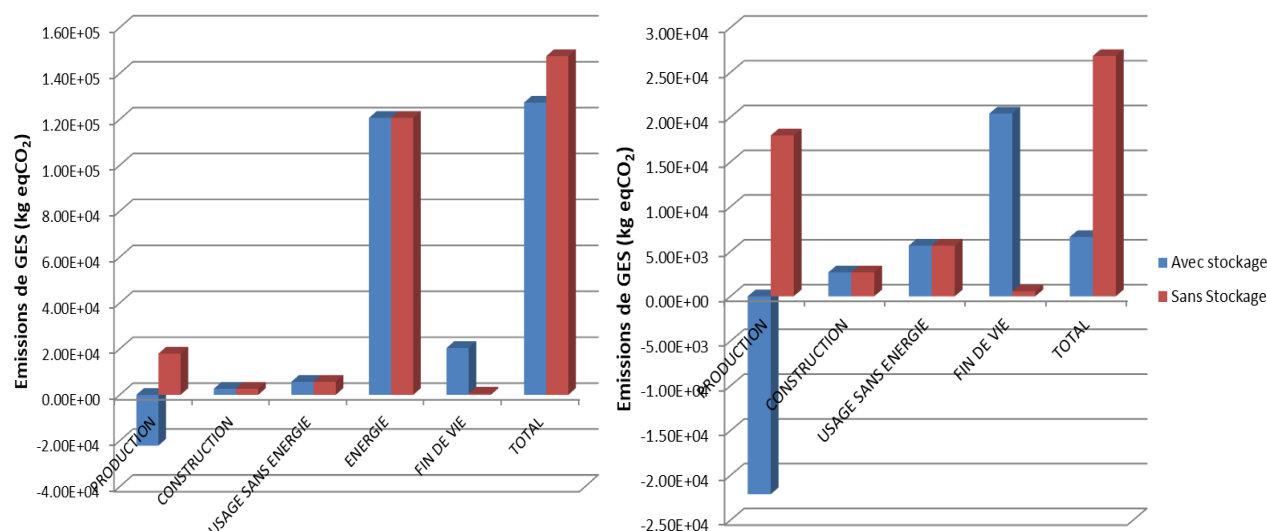


Figure 4.7 Bilan carbone corrigé avec et sans prise en compte du stockage du carbone

La considération du stockage du carbone réduit le bilan carbone total de l'habitation de 14 %, et même de 75 % celui lié aux matériaux.

4.4 Discussion

De ces résultats, et plus largement de l'essai, un certain nombre d'éléments importants peuvent être retirés. Mais il ne faut pas perdre de vue les lacunes, postulats et hypothèses, assumés de manières plus ou moins explicites tout au long de la réflexion et de l'analyse.

4.4.1 Bilan

L'objectif premier de cet essai était de juger l'efficacité de l'usage des matériaux biosourcés dans les maisons individuelles pour lutter contre les changements climatiques. Le premier enseignement à en tirer est la nécessité de distinguer les matériaux d'origines agricoles et forestiers tant leurs impacts sur leurs lieux de production ne sont pas comparables. De ce fait, le principe d'un stockage supplémentaire de carbone ne peut être admis que dans le cas de l'origine agricole.

Les résultats des ACV effectués et les traitements subséquents confirment quant à eux un certain nombre d'hypothèses implicites quant aux avantages des matériaux biosourcés dans leur ensemble, mais amènent également certaines interrogations nouvelles.

Le premier niveau de traitement des données, à savoir le bilan carbone issu des ACV, met deux éléments en valeur. En premier lieu, l'important impact du béton comparativement au bois. Le bilan carbone des matériaux augmentant de plus de 90 % avec l'usage d'une structure lourde en béton. L'origine de cette augmentation réside dans l'augmentation du volume et à fortiori de la masse de matériaux structurants

nécessaire dans le cas du béton. En effet, le bilan carbone d'une tonne de béton utilisé dans les scénarios n'est que de 142 kg CO₂-eq soit moindre que celui d'une tonne de bois d'ossature (autour de 193 kg CO₂-eq).

L'intérêt de la structure en bois réside tout d'abord dans sa légèreté et donc dans la faible quantité de matériaux nécessaire. De plus, considérer le bois comme carboneutre permet de limiter considérablement son impact. Une tonne de bois étant composé de 1,8 tonne de CO₂, son bilan carbone est extrêmement faible devant sa composition chimique. Le manque de certitude sur l'absence d'un potentiel déstockage temporaire de carbone est préjudiciable sur les conclusions qu'on peut tirer de ces résultats concernant le bois. Une piste d'amélioration des présents résultats serait d'arriver à chiffrer pour les forêts québécoises les variations de carbone total engendrées par l'exploitation.

En second lieu, la dominance de l'énergie électrique dans le bilan carbone d'une habitation d'une durée de vie de 60 ans. Malgré l'isolation imposante des scénarios considérés, la consommation énergétique est massive, 15 614 kWh par an. De plus, l'empreinte carbone du mix énergétique québécois relativement importante malgré la quasi-exclusivité de l'hydroélectricité. Cette importante consommation est due à deux facteurs : la rudesse de l'hiver québécois et la superficie de la maison. Autant le facteur climatique n'est pas une variable aisément modifiable, à moins de migrer vers des régions plus tempérées ; autant la superficie de l'habitation, 170m², peut sembler excessive pour une maison monofamiliale à 3 chambres, donc conçue pour une cellule familiale composée de deux parents et deux ou trois enfants. Ainsi, le premier vecteur de réduction du bilan carbone des maisons serait la réduction de leur superficie.

Le second niveau de traitement des données offre une vision plus optimiste dans la mesure où la prise en compte de la temporalité des émissions réduit l'impact des émissions postérieur à la construction, notamment celles liées à l'énergie d'usage. Ces résultats n'étant avant tout qu'une étape nécessaire pour permettre la prise en compte du stockage du carbone, ils n'apportent pas d'enseignement novateur. Si ce n'est l'intérêt de repousser les émissions le plus possible, mais la possibilité de retarder des émissions ne se présente que rarement dans les faits.

Le troisième niveau est sûrement celui qui présente le plus d'intérêt pour juger de la pertinence des matériaux biosourcés. L'importance des réductions du bilan carbone engendré par le stockage est considérable. L'usage de 20 tonnes de chènevotte de chanvre réduisant des trois quarts l'impact climatique des matériaux utilisés. En incluant les impacts liés à leur production, chaque tonne de chènevotte réduit de 0,77 t le bilan total en équivalent CO₂. Les isolants biosourcés d'origines agricoles,

et en particulier la chènevotte de chanvre, possèdent une double qualité inattendue. Leur moins bonne résistance thermique demande un plus grand volume d'isolant, et leur densité est bien plus élevée que celle des autres isolants. De ce fait, la masse nécessaire pour atteindre un même degré d'isolation est très largement supérieure à celles des autres isolants, ce qui rend leurs stocks de carbone d'autant plus impressionnant. Un des enseignements inattendus qu'on peut tirer de ces résultats est l'avantage environnemental de surdimensionner les isolations d'origine agricole pour réduire l'empreinte carbone. Il faut tout de même garder à l'esprit que la masse importante d'isolant nécessaire engendre certaines problématiques, notamment pour la structure qui doit supporter une contrainte supplémentaire, et pour le coût global de la construction qui s'en verra augmenté.

4.4.2 Limites

Le présent essai, comporte un certain nombre de limites, tant sur l'aspect calculatoire des ACV, qu'en amont.

En premier lieu, il convient de mentionner ici quelques limites à l'absence de stockage du carbone dans les matériaux forestiers. En effet, les chiffres présentés dans la section 3.4, ne sont pas propres à la forêt québécoise, mais concerne des forêts du nord des États-Unis. De ce fait, il peut exister une surestimation du NEP dans les calculs, ce qui est à même de remettre en cause, la démonstration. Par ailleurs, l'échelle géographique considérée, l'écosystème, néglige les impacts des feux et épidémies, qui jouent un rôle dans la balance des stocks de carbone chez les forêts âgées. Cela dit, même si le NEP réel des forêts Québécoises âgées est plus faible qu'attendu, l'absence de stockage du carbone semble réelle, bien que plus difficilement démontrable, au moins pour les forêts mixtes comme au sud du Québec (Nunery et Keeton, 2010). Une telle démonstration demanderait des chiffres de NEP spécifiques à la région, mais surtout de prendre en compte la finitude de la vie des matériaux bois et les pertes en scierie.

Par contre, considérer les matériaux agricoles comme un stock supplémentaire de carbone est aussi discutable. En effet, les terres agricoles québécoises étaient pour l'immense majorité des forêts, détruites pour permettre l'agriculture. Le stock de carbone étant très largement plus élevé dans les forêts, une déforestation engendre une diminution des stocks qui balance, à minima, le stockage des matériaux agricoles. Par ailleurs, on peut concevoir qu'une terre agricole actuelle laissée à l'abandon redevienne assez rapidement une forêt. Les dynamiques de reforestation et de reconstitution du stock de carbone dans le sol n'étant pas bien connues, il est difficile de trancher sur la meilleure option entre la production de matériaux agricoles ou la reforestation. Même si la production agricole l'emportait, seule une partie du stock de carbone pourrait être considérée comme supplémentaire et non la totalité. Le fait

de considérer les matériaux agricoles comme des stocks supplémentaires à part entière n'est valide que si la terre agricole actuelle doit demeurer en l'état. C'est notamment le cas si la production s'inscrit dans une rotation des cultures ayant pour but d'éviter l'épuisement des sols et le développement de maladies et de nuisibles.

Les résultats des ACV et donc l'ensemble des analyses qui en découlent demeurent des approximations. En effet les ACV effectuées sont simplifiées et ne prétendent pas respecter les règles d'art (notamment les normes ISO 14040 et 14044). Néanmoins, deux biais principaux semblent dominer, tout en demeurant inquantifiables en termes de marge d'erreur. Le premier, d'ordre dispersif, donc variable entre les scénarios, est lié au fait d'avoir considéré la dégradation en fin de vie des matériaux biosourcés comme étant aérobie et n'entraînant qu'une émission de CO₂. Ce qui postule une bonne gestion de ces déchets en fin de vie. Une dégradation anaérobie non contrôlée engendrerait un rejet de méthane important dans l'atmosphère. Le méthane ayant une durée de vie faible, 12,4 ans en moyenne, retarder son émission de 60 ans n'engendre qu'un gain marginal de moins de 5 % de son impact à 100 ans. De plus, à un horizon de 100 ans, il possède un PRG de 25 fois supérieur à celui du CO₂, donc à partir de 2 % de méthanisation de la masse de chènevotte, l'impact du stockage du carbone sera négatif. Il convient donc d'être extrêmement prudent sur le devenir des matériaux en fin de vie.

Le second biais est d'ordre systématique. Il impacte donc de la même manière chaque scénario et ne perturbe que négligemment les comparaisons entre les scénarios dans l'outil d'ACV. En effet, de nombreux éléments constitutifs d'une habitation, mais identiques entre les scénarios, sont absents de l'analyse. Par exemple, les revêtements des sols, l'ensemble du mobilier intérieur, l'aménagement des réseaux d'eaux et d'électricités ne sont pas pris en comptes. De plus, comparativement à la maison ERE 132 existante, des modifications ont été apportées, en particulier sur l'aménagement extérieur, avec la suppression de l'escalier externe, des terrasses et de l'aménagement des jardins. Par ailleurs, l'aménagement du réseau routier, et la nécessité de construire des emplacements de stationnement, engendré par la construction d'une maison, sont fortement impactants pour l'environnement et le climat, sans que cela soit pris en compte dans les analyses.

Cela nous amène à une interrogation de fond sur la pertinence de la maison individuelle, fut-elle le moins impactante possible. Cela nous renvoie aux éléments mentionnés dans le premier chapitre, concernant l'urbanisme nord-américain, basé sur la propriété individuelle induisant un fort étalement urbain. Finalement, le meilleur vecteur de réduction des GES n'est-il pas la densification urbaine, limitant

transport, infrastructure, et consommations énergétiques (un immeuble, à isolation égale, nécessite moins de chauffage par m² qu'une maison autonome) et non le choix des matériaux ?

Une analyse complémentaire, pourrait être de comparer le bilan carbone surfacique et/ou par habitant des appartements de villes à ceux des maisons individuelles. Et ce tout d'abord à matériaux identiques, puis dans un second temps en comparant écohabitation et appartements conventionnels. Dans cette optique, il semble fondamental d'inclure les impacts indirects des constructions sur l'aménagement du territoire, en particulier sur les réseaux routiers.

Cette question de la pertinence des maisons rejoint également l'aspect symbolique de la maison comme moyen d'émancipation individuelle, et plus largement les limites d'une société basée sur un modèle individualiste face à des enjeux mondiaux et hautement collectifs comme le réchauffement climatique. Est-il réellement possible qu'un des symboles les plus marqués de cet individualisme, à savoir la maison personnelle, puisse être le fer-de-lance d'une bataille collective ? On peut également se demander si porter toute son attention sur le choix des matériaux n'est finalement pas ignorer les modifications systémiques nécessaires pour répondre à l'enjeu climatique ?

CONCLUSION

Devant les changements climatiques, l'humanité dans son ensemble se doit de réagir pour limiter les dégâts, et ce, simultanément dans tous les domaines possibles. Mais réagir, et même agir, ne suffit pas. Il faut le faire efficacement. La grande thématique dans laquelle se glisse cet essai concerne la définition des meilleurs choix. Comment faire, face à un dilemme, pour choisir l'option la moins néfaste pour le climat ? Savoir et pouvoir juger de la pertinence d'alternative est fondamental pour éviter l'écueil du : « on ne peut pas faire pire, fonçons ! ». Ainsi remettre en question ce qui semble acquis est fondamental dans la démarche scientifique moderne. En particulier quand des courants de pensée s'éloignent du consensus scientifique, notamment par de la vulgarisation à outrance. L'exemple le plus parlant dans les milieux écologistes modernes est le fait de considérer toute chose issue de la nature, et donc naturelle, comme positif, et par opposition les choses issues de l'anthroposphère, comme étant à priori négatives.

L'objet de cet essai, le matériau biosourcé, était, dans le choix même de l'adjectif, très fortement connoté positivement naturel. L'objectif principal, qui était de juger de la pertinence de ces matériaux dans la construction de maison individuelle, induit dans sa formulation une remise en question de cet à priori positif. Les résultats finaux de cet essai montrent le réel impact positif du remplacement des matériaux traditionnels par des biosourcés. Mais ils mettent également en évidence le fossé qu'il existe au sein même de l'appellation matériaux biosourcés, entre ceux d'origine forestière et agricole.

Tendre vers cet objectif principal n'a été possible que par l'atteinte de ceux, plus spécifiques, qui ont jalonné le déroulement de cette démarche. Le premier, consacré à la comparaison du cycle de vie des matériaux biosourcés et de leurs homologues traditionnels, a permis d'avoir une vue d'ensemble des différents matériaux. Il a notamment fait ressortir les conséquences majeures de la transformation des matériaux traditionnels sur l'environnement. La nécessité de chauffer très fortement les matières premières est un point commun partagé par de nombreux matériaux traditionnels. Alors que les matériaux d'origine biosourcée ne nécessitent pas de transformations calorifiques, ce qui présente un gain majeur en termes de consommation d'énergie.

Le second qui abordait le mécanisme de stockage du carbone dans les matériaux biosourcés a permis de développer ce concept en interrogeant la production forestière. La question centrale soulevée par cet objectif est de savoir si une forêt exploitée permet un meilleur accroissement des stocks totaux de carbone que ne le ferait une forêt non exploitée. Et la réponse est finalement négative. Par contre, son équivalent pour les terres agricoles se conclut par une réponse positive. De fait, une distinction majeure est faite entre les matériaux d'origine agricole qui engendreraient un réel stock de carbone

supplémentaire et ceux d'origine sylvicole qui n'en engendrent pas. Néanmoins, les matériaux d'origine agricole engendrent d'autres problématiques liées à l'utilisation des sols. L'usage de terres agricoles à des fins de production de matériaux risque d'impacter la production de biens alimentaires ce qui peut accroître les importations agricoles et réduire l'autosuffisance alimentaire. L'autre possibilité est de déforester pour pouvoir cultiver ces végétaux, ce qui réduirait considérablement le stock de carbone du site et balancerait complètement l'intérêt stockeur des matériaux produits. Les meilleures pratiques actuelles semblent d'intégrer ces cultures dans une rotation pluriannuelle de grandes cultures.

Le troisième objectif spécifique visait à développer une méthode précise permettant de prendre en compte ce stockage du carbone. Celle-ci a tout d'abord nécessité une bonne compréhension des mécanismes engendrant le réchauffement climatique par les GES. C'est en comparant les variations des forçages radiatifs d'une émission actuelle et future sur les 100 prochaines années qu'on peut en déduire un impact climatique total à 100 ans. Ainsi, on arrive à développer une méthode plus précise et plus juste que la règle des 1 % par an (ou assimilée) utilisée par certaines méthodes d'ACV. Cette méthode permet de quantifier l'intérêt d'un stockage de carbone. Ainsi retarder de 60 ans une émission de CO₂ permet de réduire son impact de plus de moitié là où un retardement de 20 ans ne permet qu'un gain de 15 %.

Le quatrième et dernier objectif spécifique a été l'analyse et la comparaison des trois scénarios d'une même construction. Basé sur le modèle de la maison ÉcoRésidence de l'Est 132 (ERE 132), cette comparaison a permis de confirmer l'intérêt général des matériaux biosourcés par rapport à ceux en béton. Ainsi l'usage d'une structure en bois permet de réduire de 49 % le bilan carbone des matériaux. Mais, plus important encore, l'usage de chènevotte de chanvre arrive grâce au mécanisme de stockage du carbone à réduire de 75 % supplémentaire le bilan carbone de la maison structurée en bois.

Au final, favoriser les matériaux stockeurs de carbone permettrait une nette amélioration des conséquences climatiques d'une construction. Il est même envisageable d'arriver à atteindre des maisons dont l'impact des matériaux sur le réchauffement soit nul, voire même négatif. L'usage de matériaux d'origine agricole n'est pas le seul levier d'action pour réduire l'impact climatique des constructions. Le choix de matériaux locaux et le moins transformé possible, par exemple, sont des pistes à privilégier. Par ailleurs, le caractère démontable des constructions semble un point majeur à considérer pour permettre une réutilisation massive des matériaux. Cela permettrait également de faciliter leur recyclage en fin de vie lors de la démolition.

Néanmoins dans le contexte québécois, c'est la consommation énergétique qui demeure l'origine principale des émissions. Même dans le cas d'une structure en béton, l'énergie correspond à plus de 70 % des GES émis. Et cette proportion monte jusqu'à 95 % quand l'on utilise des isolants en chènevotte ainsi qu'une structure en bois. De nombreuses améliorations des logements actuels permettent de réduire cette consommation. En premier lieu, réduire la superficie des habitations permet de réduire d'autant l'énergie de chauffage. Même si cela est déjà très présent dans les scénarios analysés, une isolation importante est cruciale ainsi que l'orientation au maximum des surfaces vitrées au sud. À l'usage, la réduction de la température intérieure de quelques degrés en hiver permet également des gains intéressants.

Par ailleurs, il ne faut pas oublier que le réchauffement climatique n'est pas le seul enjeu environnemental lié aux bâtiments. D'autre thématique, comme la qualité de l'air intérieur, la pression sur les ressources ou encore les diverses pollutions engendrées par les bâtiments sont à considérer dans la conception et la réalisation d'une habitation.

Le prolongement logique de cet essai serait de s'intéresser aux alternatives permettant une réduction de la consommation énergétique des habitations, ou du moins de ses impacts sur l'environnement. De plus, intégrer les externalités des projets de construction, en particulier les réseaux routiers, semble absolument nécessaire pour pouvoir arbitrer de manière éclairée entre différentes alternatives.

RÉFÉRENCE

- Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME). (2014). *Identification des gisements et valorisation des matériaux biosources en fin de vie en France* (p. 169). Repéré à <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/gisements-valorisation-biosources-fin-vie-2014-rapport-final.pdf>
- Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME). (2016a). *Déchets du bâtiment* (p. 19). Repéré à <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/fiche-technique-dechets-batiment-2016-08.pdf>
- Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME). (2016b). *Identification des freins et des leviers au réemploi de produits et matériaux de construction* (p. 149). Repéré à <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-27317-freins-leviers-reemploi-btp.pdf>
- Akpakouma, A. (2017). *Culture émergentes en grandes cultures Lin et Chanvre*. Repéré à <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Regions/BasSaintLaurent/culturesemergentesgrandescultureslinchanvredixsept.pdf>
- Arrigoni, A., Pelosato, R., Melià, P., Ruggieri, G., Sabbadini, S. et Dotelli, G. (2017). Life cycle assessment of natural building materials: the role of carbonation, mixture components and transport in the environmental impacts of hempcrete blocks. *Journal of Cleaner Production*, 149, 1051-1061. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.161>
- Astudillo, M. F., Vaillancourt, K., Pineau, P.-O. et Amor, B. (2017). Can the household sector reduce global warming mitigation costs? sensitivity to key parameters in a TIMES techno-economic energy model. *Applied Energy*, 205, 486-498. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917310036>
- Athena Sustainable Materials Institute. (2004). *Minnesota demolition survey*. Repéré à http://www.athenasmi.org/wp-content/uploads/2012/01/Demolition_Survey.pdf
- Athena Sustainable Materials Institute. (2018). Athena Impact Estimator for Building (version 5.3.01). Repéré à <https://calculatelca.com/software/impact-estimator/download-impact-estimator/>
- Aubry, B. (2013). Vers une construction verte. Repéré à https://www.csnconstruction.qc.ca/wp-content/uploads/2018/05/2013-05_batisseur_csnconstruction.pdf
- Bâti Concept écologique. (2015). L'énergie grise dans le bâtiment. Repéré à <http://www.bc-maison-ecologique.fr/votre-maison-bce.energie-grise.html>
- Bâti Concept écologique. (s.d.). Quel isolant choisir et pour quel durabilité ? Repéré à <http://www.bc-maison-ecologique.fr/actualites.la-duree-de-vie-d-un-isolant.html>
- Bazed. (s.d.). Conception construction Zéro Déchet. Repéré à <http://www.bazed.fr/>
- Bouzahzah, H. (2013). *Modification et amélioration des tests statiques et cinétiques pour une prédiction fiable du drainage minier acide* (Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda). Repéré à http://depositum.uqat.ca/578/1/BOUZHZAHA%2C_HASSAN.pdf
- Buchholz, T., Friedland, A. J., Hornig, C. E., Keeton, W. S., Zanchi, G. et Nunery, J. S. (2014). Mineral soil carbon fluxes in forests and implications for carbon balance assessments. *Global Change Biology Bioenergy*, 6, 305-311. Repéré à <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/gcbb.12044>
- Burgun, I. (2018). Forêt boréale : pour en revenir des coupes à blanc. *Science Presse*. Repéré à <https://www.sciencepresse.qc.ca/actualite/2018/10/15/foret-boreale-pour-revenir-coupes-blanc>

- Canada Wood Council. (s.d.). *Sustainability and Life Cycle Analysis for Residential Buildings* (p. 16). Repéré à https://cwc.ca/wp-content/uploads/publications-IBS4_Sustainability_SMC_v2.pdf
- Carey, E. V., Sala, A., Keane, R. et Callaway, R. M. (2001). Are old forests underestimated as global carbon sinks? *Global Change Biology*, 7, 339-344. Repéré à <https://pubag.nal.usda.gov/pubag/downloadPDF.xhtml?id=40599&content=PDF>
- Carrière Bernier. (2018). Liste des prix 2018. Repéré à <http://www.carrierebernier.com/images/stories/pdf/2017/pierre%2017.pdf>
- Carrière union. (2019). Liste des prix 2019. Repéré à http://www.carriereunion.com/pdf/prix_carriere_union_2019.pdf
- Centre d'expertise sur la construction commerciale en bois (Cecobois). (2008). *Stratégie d'utilisation du bois dans la construction au Québec* (p. 24). Repéré à https://www.cecobois.com/publications_documents/strategie-utilisation-du-bois.pdf
- Centre d'expertise sur la construction commerciale en bois (Cecobois). (s.d.). Cecobois.
- Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique. (2017). Poussières en suspension. Repéré à <https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/poussieres-en-suspension>
- Ciarlo, S. et Lalande, F. (2008). *La nouvelle « R » de l'isolation*. Repéré à <https://www.cebq.org/wp-content/uploads/2015/09/CEBQ-224.pdf>
- Collet, P. (2015). Un marché français dépendant des cimenteries. *Environnement & Technique*, (344), 46-48. Repéré à <https://www.actu-environnement.com/ae/dossiers/combustibles-solides-recuperation/marche-francais-dependant-cimenteries.php>
- Commission de coopération environnementale (CCE). (2008). *Bâtiment écologique en Amérique du nord*. Montréal. Repéré à <http://www3.cec.org/islandora/fr/item/2335-green-building-in-north-america-opportunities-and-challenges-fr.pdf>
- Commission de la construction du Québec (CCQ). (2018). *Statistiques annuelles de l'industrie de la construction 2017*. Repéré à https://www.ccq.org/~media/PDF/Recherche/StatistiquesHistoriques/2017/intro_stats_2017.pdf
- Conseil Architecture Urbanisme Environnement. (s.d.). *Guide des matériaux isolants*. Repéré à http://www.cg43.fr/sites/cg43/IMG/pdf/guide_des_materiaux__isolants.pdf
- Conseil du bâtiment durable du Canada (CBDCa). (2016). *Cadre de référence pour les bâtiments à carbone zero* (p. 51). Repéré à http://batimentdurable.ca/fichiers/depot/2016_cagbc_zerocarbon_fr_0.pdf
- Courard, L. et Bissonnette, B. (2016). Réparation des ouvrages en béton armé. Repéré à <https://www-techniques-ingenieur-fr.ezproxy.usherbrooke.ca/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/rehabilitation-et-remise-aux-normes-des-batiments-42827210/reparation-des-ouvrages-en-beton-arme-c6300/#auteurs>
- Desjardins, R. et Monderie, R. (1999). *L'Erreur boréale*. Documentaire. Repéré à <https://vimeo.com/129175177>
- Dupre, B. (2014). Le végétal en construction Bâtir durable avec des ressources de proximité. *Techniques de l'ingénieur Environnement et construction, base documentaire : TIB552DUO*. (ref. article : c8104). Repéré à <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/environnement-et-construction-42552210/le-vegetal-en-construction-c8104/>

- Écohabitation. (2012). Dalle sur sol ou sous-sol ? Repéré à <https://www.ecohabitation.com/guides/2389/dalle-sur-sol-ou-sous-sol/>
- Écohabitation. (2014). Pare-air et pare-vapeur : des barrières efficaces pour protéger la maison des intempéries. Repéré à <https://www.ecohabitation.com/guides/1292/pare-air-et-pare-vapeur-des-barrieres-efficaces-pour-protger-la-maison-des-intemperies/>
- Edeis pro. (s.d.). Bâtiment sain. Repéré à <http://www.edeis-pro.com/batiment-sain>
- Encyclopaedia Universalis. (s.d.). Autotrophie & hétérotrophie. Repéré à <https://www.universalis.fr/encyclopedie/autotrophie-et-heterotrophie/>
- Enerj. (2018). *Rénovation énergétique du bâtiment*. Repéré à <https://www.enerj-meeting.com/documents/manifeste-enerj-meeting-2018.pdf>
- Équiterre. (2017). *Analyse du cycle de vie de la maison du développement durable*. Repéré à http://equiterre.org/sites/fichiers/rapportacv_final_web.pdf
- Ghorra-Gobin, C. (2013). La banlieue, rêve américain ou espace en voie de disparition ? *Esprit*. Repéré à <https://esprit.presse.fr/article/ghorra-gobin-cynthia/la-banlieue-reve-americain-ou-espace-en-voie-de-disparition-37415>
- Gouvernement du Canada. (2017). Les logements au Canada. Repéré à <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2016/as-sa/98-200-x/2016005/98-200-x2016005-fra.cfm>
- Gouvernement du Québec. (2002). *L'industrie québécoise des isolants pour le bâtiment*. Repéré à <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/bs59248>
- Gouvernement du Québec. Règlement sur l'économie de l'énergie dans les nouveaux bâtiments (2018). Repéré à <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cr/E-1.1,%20r.%201>
- Gouvernement du Québec. Règlement sur les matières dangereuses. Repéré à <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowTdm/cr/Q-2,%20r.%2032>
- Groupe de travail sur la main-d'œuvre. (2018). *La transition énergétique et la main-d'œuvre québécoise* (p. 95). Repéré à http://copticom.ca/wp-content/uploads/2018/01/2018_Document_main-oeuvre-et-transition-%C3%A9nerg%C3%A9tique.pdf
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2000). *Utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie*. Repéré à <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srl-fr-1.pdf>
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2013). *Changements climatiques 2013 Les éléments scientifiques*. Repéré à https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2014). *Changements climatiques 2014 Rapport de synthèse*. Repéré à https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_fr.pdf
- id verre. (2004). Recyclage et valorisation du verre dans le secteur du bâtiment. Repéré à <http://www.idverre.net/veille/dostec/recyclage-batiment/recyclage-batiment.php>
- Infociments. (2018). *L'essentiel*. Repéré à <https://www.infociments.fr/sites/default/files/article/fichier/Stat%202018.pdf>

- Institut de la statistique du Québec. (2009). *Données sociales du Québec* (p. 235). Repéré à <http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/conditions-vie-societe/donnees-sociales09.pdf#page=193>
- Institut de la statistique du Québec. (2018a). *Le Québec chiffre en main*. Repéré à http://www.stat.gouv.qc.ca/quebec-chiffre-main/pdf/qcm2018_fr.pdf
- Institut de la statistique du Québec. (2018b). *Résultats de l'Enquête sur la population active pour le Québec*. Repéré à <http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/travail-remuneration/resultats-epa-201812.pdf>
- Jancovici, J. (2015). *Dormez tranquilles jusqu'en 2100 et autres malentendus sur le climat et l'énergie*. Odile Jacob.
- Jardins de Métis. (2014). ERE 132 vitrine d'excellence en écoconstruction. Repéré à <https://ere132.com/>
- Jolivet, C. (2000). *Le carbone organique des sols des Landes de Gascogne. Variabilité spatiale et effets des pratiques sylvicoles et agricoles*. Repéré à <https://prodinra.inra.fr/ft?id={85A6DFF9-AF66-4A61-81EF-82539C159442}&original=true>
- Larousse. (s.d.). Matériau. Repéré à <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/mat%C3%A9riau/49841>
- Laurent, A.-B., Boucher, J.-F., Villeneuve, C. et D'Amours, S. (2011). Quelques enjeux soulevés par l'analyse de cycle de vie d'un produit du bis en contexte québécois. Repéré à http://www.simagi.polymtl.ca/cigi2011/articles/_Laurent-Quelques.pdf
- Les Architectures. (2009). La réutilisation du béton préfabriqué. Repéré à <http://lesarchitectures.com/2009/10/06/la-reutilisation-du-beton-prefabrique-ou-un-processus-de-construction-en-question/>
- Leturcq, P. (2011). La neutralité carbonée du bois énergie : un concept trompeur ? *Revue forestière française*, (6), 723-734. Repéré à <http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/47204/LETURCQ.pdf?sequence=1>
- Levasseur, A., Lesage, P., Margni, M., Deschênes, L. et Samson, R. (2010). Considering Time in LCA: Dynamic LCA and Its Application to Global Warming Impact Assessments. *Environmental Science & Technology*, 44(8), 3169-3174. Repéré à <https://doi.org/10.1021/es9030003>
- Lindsey, R. (2009). Climate and Earth's Energy Budget. Repéré à <https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance>
- Lippke, B., Oneil, E., Harrison, R., Skog, K., Gustavsson, L. et Sathre, R. (2011). Life cycle impacts of forest management and wood utilization on carbon mitigation: knowns and unknowns. *Carbon Management*, 2(3), 303-333. Repéré à <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.4155/cmt.11.24?needAccess=true>
- Lugt, P. van der, Dobbelsteen, A. A. J. F. van den et Janssen, J. J. A. (2006). An environmental, economic and practical assessment of bamboo as a building material for supporting structures. *Construction and Building Materials*, 20(9), 648-656. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061805001157>
- Luyssaert, S., Schulze, E.-D., Börner, A., Knohl, A., Hessenmöller, D., Law, B. E.,... Grace, J. (2008). Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature*, 455, 213. Repéré à https://www.researchgate.net/publication/23250353_Old-growth_forests_as_global_carbon_sinks
- Michel Dewulf. (2015). *Le torchis, mode d'emploi* (2e éditions). Eyrolles.

- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). (s.d.). Notions de coupe à blanc et déforestation. Repéré à <https://mffp.gouv.qc.ca/forets/faq/index.jsp#notions>
- Ministère des Ressources naturelles. (1999). *Manuel de mise en valeur des forêts privées du Québec*. Repéré à <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/bs44750>
- Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs (MRNFP). (2004). *La technologie du sciage et le rendement en bois d'œuvre résineux*. Repéré à <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/entreprises/TechnologieSciageRendementRes.pdf>
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2015). *Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2015 et leur évolution depuis 1990* (p. 32). Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/2015/Inventaire1990-2015.pdf>
- Montoro Girona, M., Lussier, J.-M., Morin, H. et Thiffault, N. (2018). Conifer Regeneration After Experimental Shelterwood and Seed-Tree Treatments in Boreal Forests: Finding Silvicultural Alternatives. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1145. Repéré à <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2018.01145/full>
- Nunery, J. S. et Keeton, W. S. (2010). Forest carbon storage in the northeastern United States: Net effects of harvesting frequency, post-harvest retention, and wood products. *Forest Ecology and Management*, 259, 1363-1375. Repéré à https://www.uvm.edu/giee/pubpdfs/Nunery_2010_Forest_Ecology_and_Management.pdf
- Office québécois de la langue française. (2012). Le grand dictionnaire terminologique. Repéré à <http://www.granddictionnaire.com/>
- Olivier, M. (2017). *Chimie de l'environnement* (2^e éd.). Sherbrooke.
- Parc Eco Habitat. (2011). *Comparatif global des isolants*. Repéré à <http://www.parc-ecohabitat.com/Files/30845/11264173150663.pdf>
- Pawelzik, P., Carus, M., Hotchkiss, J., Narayan, R., Selke, S., Wellisch, M.,... Patel, M. K. (2013). Critical aspects in the life cycle assessment (LCA) of bio-based materials – Reviewing methodologies and deriving recommendations. *Resources, Conservation and Recycling*, 73, 211-228. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344913000359>
- PBM solutions structures. (2015). Fermes de toit. Repéré à <http://produitspbm.com/produits/fermes-de-toit/>
- Pittau, F., Krause, F., Lumia, G. et Habert, G. (2018). Fast-growing bio-based materials as an opportunity for storing carbon in exterior walls. *Building and Environment*, 129, 117-129. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132317305644>
- Prat, R. et Moreau, F. (2004). La photosynthèse : généralités. *Planet-Vie*. Repéré à <https://planet-vie.ens.fr/article/1507/photosynthese-generalites>
- Pregitzer, K. S. et Euskirchen, E. S. (2004). Carbon cycling and storage in world forests: biome patterns related to forest age. *Global Change Biology*, 10(12), 2052-2077. Repéré à <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2486.2004.00866.x>
- Prétot, S., Collet, F. et Garnier, C. (2013). Life cycle assessment of a hempconcrete wall : Impact of thickness and coating. Repéré à <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00916557/document>
- Recovering. (s.d.). Le plâtre - Valorisation et recyclage. Repéré à <http://recovering.fr/index.php?id=29>

- Rossi, M., André, J. et Vallauri, D. (2015). *Le carbone forestier en mouvements*. Lyon : Réseau Ecologique Forestier Rhône-Alpes (REFORA). Repéré à https://www.researchgate.net/profile/Magali_Rossi2/publication/275955696_Rossi_M_Andre_J_Vallauri_D_2015_Le_carbone_forestier_en_mouvements_Elements_de_reflexion_pour_une_politique_maximisant_les_atouts_du_bois_Lyon_Rapport_REFORA_40_pages/links/554b2d350cf29752ee7c3ddb.pdf
- Sandanayake, M., Zhang, G. et Setunge, S. (2019). Estimation of environmental emissions and impacts of building construction A decision making tool for contractors. *Journal of Building Engineering*, (21), 173-185. Repéré à https://ac-els-cdn-com.ezproxy.usherbrooke.ca/S235271021830247X/1-s2.0-S235271021830247X-main.pdf?_tid=deebad52-f99b-473f-ad5a-ea61692163a5&acdnat=1547204833_5bc1633b6ee11de2a4f8b5ded77e085f
- Scherer, L. et Pfister, S. (2016). Hydropower's Biogenic Carbon Footprint. *PLoS ONE*, 11, 1-11. Repéré à <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0161947>
- Section du Québec du Conseil du bâtiment durable du Canada. (2013). *Consultation publique : De la réduction des gaz à effet de serre à l'indépendance énergétique du Québec* (p. 35). Repéré à <http://batimentdurable.ca/fichiers/memoire-de-la-section-du-quebec-du-cbdca-consultation-ges-septembre-2013-final.pdf>
- Simard, E. (2009). *Les matériaux de construction résidentielle dans une perspective durable : analyse comparative* (Université de Sherbrooke, Sherbrooke). Repéré à https://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/Essais2009/Simard_Elisabeth_13-09-09.pdf
- SwissLife. (s.d.). Combien de temps peut vivre un bâtiment ? Repéré à <https://www.swisslife.com/fr/hub/combien-de-temps-peut-vivre-un-batiment.html>
- Syndicat français de l'industrie cimentière. (2018). *La fabrication du ciment*. Repéré à https://www.infociments.fr/sites/default/files/articles/pdf/ProcessCimentierLe%CC%81gende041215_HD%20%281%29.pdf
- Techniques de l'ingénieur. (2004). La corrosion des aciers. Repéré à <https://www-techniques-ingenieur-fr.ezproxy.usherbrooke.ca/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/techniques-du-batiment-connaître-les-matériaux-de-la-construction-43804210/la-corrosion-des-aciers-tba1054/>
- Thinkerview. (2018). Philippe Bihouix : Le mensonge de la croissance verte ? Repéré à <https://www.youtube.com/watch?v=Bx9S8gvNKkA>
- Thiffault, N., Roy, V., Prigent, G., Cyr, G., Jobidon, R. et Ménétrier, J. (2003). La sylviculture des plantation résineuses au Québec. *Le naturaliste Canadien*, 127(1), 63-80. Repéré à <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Cyr-Guillaume/Nat-Can-127-1.pdf>
- U.S. Climate Change Science Program. (2007). *The First State of the Carbon Cycle Report (SOCCR) The North American Carbon Budget and Implications for the Global Carbon Cycle* (p. 264). Repéré à <https://cdiac.ess-dive.lbl.gov/SOCCR/pdf/sap2-2-final-all.pdf>
- Vachon, N. (2018). *Étude sur l'abordabilité de l'éconconstruction : le cas de la maison ERE132* (Université de Sherbrooke, Sherbrooke). Repéré à https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/11894/Vachon_Nicholas_MEnv_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y

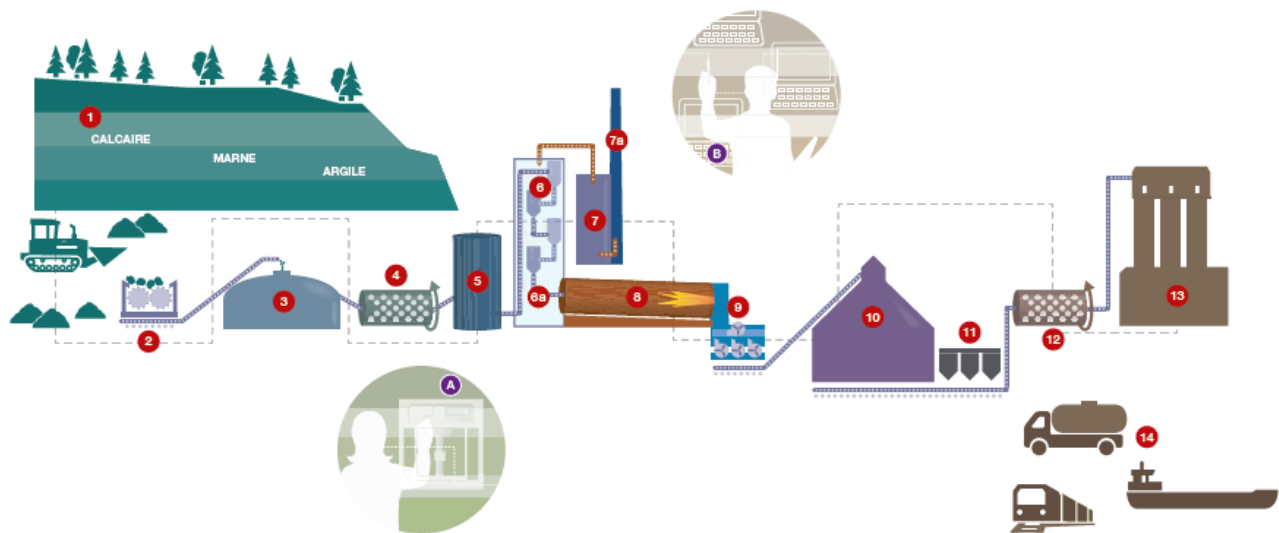
- Vallet, P. (2005). *Impact de différentes stratégies sylvicoles sur la fonction puits de carbone des peuplements forestiers*. Repéré à https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/38/054/38054648.pdf
- Vegetal(e). (s.d.). Chènevotte en vrac. Repéré à http://www.vegetal-e.com/fr/chenevotte-en-vrac_301.html
- Voss, K., Musall, E. et Lichtmeß, M. (2011). From Low-Energy to Net Zero-Energy Buildings: Status and Perspectives. *Journal of Green Building*, 6(1), 46-57. Repéré à <https://doi.org/10.3992/jgb.6.1.46>
- Watson, R. T., Noble, I. R., Bolin, B., Ravindranath, N. H., Verardo, D. J. et Dokken, D. J. (2000). *IPCC Special Report on Land Use, Land-Use Change And Forestry*. Repéré à http://www.grida.no/climate/ipcc/land_use/index.htm
- Whitmore, J. et Pineau, P.-O. (2018). *Etat de l'énergie au Québec* (p. 56). Repéré à http://batimentdurable.ca/fichiers/depot/eeq2018_web-final.pdf
- Wilson, L. (2014). How big is a house? Average house size by country. Repéré à <http://shrinkthatfootprint.com/how-big-is-a-house>
- Zampori, L., Dotelli, G. et Vernelli, V. (2013). Life Cycle Assessment of Hemp Cultivation and Use of Hemp-Based Thermal Insulator Materials in Buildings. Repéré à <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es401326a>
- Zhou, G., Liu, S., Li, Z., Zhanh, D., Tang, X., Zhou, C.,... Mo, J. (2006). Old-Growth Forests Can Accumulate Carbon in Soils. *Science*, 314, 1417. Repéré à http://faculty.jsd.claremont.edu/emorhardt/159/pdfs/2007/2_30_07.pdf

BIBLIOGRAPHIE

- Amziane, S. et Sonebi, M. (2016). Overview on bio-based building material made with plant aggregate. *RILEM Technical Letters*, 1, 31-38. Repéré à <https://letters.rilem.net/index.php/rilem/article/view/9/11>
- Augusto, L., Ranger, J. et Bonneau, M. (2000). Influence des essences sur la fertilité chimique des sols. Conséquences sur les choix sylvicoles. *Revue forestière française*, 52(6), 507-518. Repéré à http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/5384/507_518.pdf?sequence=1
- Benoit, Y. (2017). *La maison à ossature bois par les schémas* (3^e éd.). Eyrolles.
- Conteville, L., Hartigh, C. den et Les amis de la Terre France. (2009). *Les écomatériaux en France*. Repéré à http://www.amisdelaterre.org/IMG/pdf/rapport_atf_les_ecomateriaux_en_france_mars09-2.pdf
- Deroubaix, G., Vial, E. et Cornillier, C. (2012). Cycles de vie des produits à base de bois et séquestration du carbone. *Innovations Agronomiques*, 18, 31-37. Repéré à <https://www6.inra.fr/ciag/content/download/3746/35974/file/Vol18-3-Deroubaix.pdf>
- Federal Office for the Environment (FOEN). (2007). *The CO₂ Effects of the Swiss Forestry and Timber Industry* (p. 104). Repéré à <https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/climate/publications-studies/publications/co2-effects-forestry-timber-industry.html>
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2007a). *Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing*. Repéré à <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg1-chapter2-1.pdf>
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2007b). *Climate change 2007 impacts, adaptation and vulnerability*. Repéré à https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4_wg2_full_report.pdf
- Luyssaert, S., Ciais, P., Piao, S. L., Schulze, E.-D., Jung, M., Zaehle, S.,... Janssens, I., A. (2010). The European carbon balance. Part 3: forests. *Global Change Biology*, 16(5), 1429–1450. Repéré à http://carbama.epoc.u-bordeaux1.fr/G_Abril/documents/Luyssaert_et_al_2010_GCB.pdf
- Nations Unies. Protocole de Kyoto à la convention-cadre des nations unies sur les changements climatiques (1998). Repéré à <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpfrench.pdf>
- O'Hare, M., Plevin, R. J., Martin, J. I., Jones, A. D., Kendall, A. et Hopson, E. (2009). Proper accounting for time increases crop-based biofuels' greenhouse gas deficit versus petroleum. *Environmental Research Letters*, 4, 1-7. Repéré à <https://iopscience.iop.org/ezproxy.usherbrooke.ca/article/10.1088/1748-9326/4/2/024001/pdf>
- Perez-Garcia, J., Lippke, B., Briggs, D., Wilson, J. B., Bowyer, J. et Meil, J. (2005). The environmental performance of renewable building materials in the context of residential construction. *Wood and Fiber Science*, 37, 3-14.
- Zaoui, C. (2017). Bioséquestration du carbone Piégeage de carbone et bio-inspiration. *Techniques de l'ingénieur Innovations en énergie et environnement, base documentaire : TIB503DUO*. (ref. article : in216). Repéré à <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/innovation-th10/innovations-en-energie-et-environnement-42503210/biosequestration-du-carbone-in216/>

LA FABRICATION DU CIMENT

PROCESS & TRANSPORTS



1 Extraction des matières premières.

2 Concasseurs primaires & secondaires : réduisent les matières premières en éléments d'une dimension maximale de 150 mm.

3 Hall pré-homogénéisation : mélange les matières premières de manière à obtenir une composition homogène.

4 Broyeur sécheur du cru : broyage de la matière première en une farine très fine, le « cru ». Pour fournir tous les constituants minéraux nécessaires à la production du clinker - fer (Fe_2O_3), alumine (Al_2O_3), ou silice (SiO_2) - on peut y ajouter de faibles proportions de matières naturelles (bauxite, oxyde de fer, schiste, argile ou sable), ou de déchets minéraux de composition chimique identique.

5 Silo d'homogénéisation du cru.

6 Tour de préchauffage + Précalcinateur : en passant par cette tour, le cru va atteindre une température de 900 °C, grâce au flux de gaz chauds sortant du four qui remontent la tour à contre-courant. C'est là que débute la décarbonatation, réaction qui détache des molécules de CO_2 contenues dans le calcaire, le transformant en chaux. Certaines cimenteries sont équipées d'un précalcinateur **6a**, foyer complémentaire dans la partie inférieure de la tour.

7 Filtre à manche : filtre les poussières des gaz sortant du four avant leur passage dans la cheminée **7a**.

8 Four rotatif : le cru préchauffé pénètre dans ce tube (3-6 m large x 50x90 m long) légèrement incliné qui tourne sur lui-même, et progresse ainsi à travers des zones de plus en plus chaudes jusqu'à atteindre les 1 450 °C. Cette chaleur intense, générée par la tuyère où sont brûlés combustibles fossiles et déchets, termine la décarbonatation et provoque la transformation du cru en clinker.

9 - 10 Refroidisseur + silo de stockage clinker : le refroidissement brutal du clinker par air soufflé finalise sa transformation. Il est stocké dans des silos sur site, et utilisé sur site au fur et à mesure des besoins de production ou envoyé vers des installations de broyage extérieures.

11 Autres constituants : d'autres matières finement broyées (laitier de haut-fourneau, cendres volantes, schistes calcinés, calcaire, fumées de silice) peuvent être ajoutées à la composition finale, pour produire un ciment répondant à des besoins spécifiques. Cela réduit d'autant la teneur en clinker et les émissions de CO_2 qui y sont associées.

12 Broyeur ciment : le clinker et les constituants sélectionnés sont finement broyés avec du gypse pour régulariser le temps de prise du produit final, fine poudre grise appelée « ciment Portland ».

13 - 14 Silos de stockage + transport du ciment : le ciment est stocké dans des silos puis expédié en vrac ou conditionné en sacs (25-35 kg). Pour ses livraisons, l'industrie cimentière cherche à favoriser les modes de transport à faibles émissions de CO_2 disponibles sur le territoire.

A Le laboratoire sur site analyse les échantillons de matières premières, constituants, combustibles, clinker et ciment prélevés tout au long du process pour garantir la conformité du produit aux normes en vigueur.

B La salle de contrôle réunit tous les équipements – systèmes experts d'exploitation, circuits vidéos, résultats en ligne de stations d'échantillonnage – qui permettent de piloter la cimenterie.

ANNEXE- 2 BILAN DES MATÉRIAUX UTILISÉS PAR SCÉNARIO

Matériaux	Unité	Maison ERE 132		Maison Béton		Maison Biosourcée	
	Unité	Total	Tonnes	Total	Tonnes	Total	Tonnes
Armature	Tonnes	0.76	0.76	6.51	6.51	0.76	0.76
Bande de papier	Tonnes	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Béton Maison ERE 132	m3	25.48	56.10	59.96	132.02	25.48	56.10
Bois résineux de grande dimension	m3	4.81	2.09	1.89	0.82	4.81	2.09
Bois résineux de petite dimension	m3	17.12	7.63	11.46	5.11	17.12	7.63
Cadre de fenêtre en bois	kg	456.82	0.46	456.82	0.46	456.82	0.46
Cellulose soufflé	m2 (25mm)	6 766.52	4.33	6 925.99	4.43	0.00	0.00
Chênevotte de chanvre	m3	0.00	0.00	0.00	0.00	218.93	21.89
Clin de pin	m2	603.80	4.90	603.80	4.90	603.80	4.90
Clous	Tonnes	0.28	0.28	0.22	0.22	0.23	0.23
Contreplaqué résineux	m2 (9mm)	225.25	1.06	112.63	0.53	225.25	1.06
Coulis grossier	m3	0.00	0.00	7.28	15.55	0.00	0.00
Feutre Organique	m2	79.58	0.06	79.58	0.06	79.58	0.06
Fibrociment	m2	30.71	0.43	30.71	0.43	30.71	0.43
Joint	Tonnes	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71
Laine de roche	m2 (25mm)	445.30	0.58	445.30	0.58	0.00	0.00
Mortier	m3	0.00	0.00	5.10	9.62	0.00	0.00
Panneau de Gypse 5/8"	m2	709.21	7.30	709.21	7.30	709.21	7.30
Parpaing de béton 8"	Blocks	0.00	0.00	3 001.84	53.22	0.00	0.00
Peinture au latex	L	1 530.02	1.15	1 530.02	1.15	1 530.02	1.15
Polyéthylène (3mm)	m2	432.16	0.03	432.16	0.03	432.16	0.03
Polyéthylène (6mm)	m2	90.08	0.01	90.08	0.01	90.08	0.01
Polystyrène expansé	m2 (25mm)	565.43	0.41	565.43	0.41	0.00	0.00
Revêtement métallique	m2	313.92	1.11	313.92	1.11	313.92	1.11
Tôle galvanisée	Tonnes	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03
Treillis métallique soudé	Tonnes	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
Triple vitrage avec lame en argon	m2	46.82	1.17	46.82	1.17	46.82	1.17
Vis, écrous et boulons	Tonnes	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Béton et liant hydraulique total	Tonnes	56.10		210.41		56.10	
Bois total	Tonnes	16.13		11.82		16.13	
Isolants	Tonnes	5.32		5.42		21.89	
TOTAL	Tonnes	90.68		246.45		107.20	

ANNEXE- 3 COMPARATIF DES LOGICIEL D'ACV (tiré de : Sandanayake, Zhang et Setunge, 2018)

Advantages of disadvantages of LCA tools for use in emission assessment at the construction stage.

Software	Nation	Developer	Advantages	Disadvantages
SimaPro	Netherland	PRé	<ul style="list-style-type: none"> International databases such as eco-invent is available and can be used in many countries User friendly & self-explanatory There is a possibility for advanced results analysis Report maker plug-in allows the model to link with MS office All life cycle stages of a product can be analyzed 	<ul style="list-style-type: none"> None of the databases in SimaPro provides data for on-site construction processes Unless a user defined process is available it is difficult to analyse Cannot be used for hybrid based LCA model Time consuming
Gabi	Germany	PE international	<ul style="list-style-type: none"> Easier to model the process in to the system Can include effects due to noise as well Enables to track cost factors as well along the life cycle of the process All life cycle stages of a product can be analyzed 	<ul style="list-style-type: none"> Issues with the applicability of databases in different countries Less amount of data is available for on-site construction processes Limited construction activities are available
BEES	USA	National Institute of Standards and Technology, USA	<ul style="list-style-type: none"> Combines an environmental score and an economic score to provide a final score All life cycle stages of a product can be analyzed Focus mainly on effects due to construction 	<ul style="list-style-type: none"> Cannot be used for hybrid based LCA model Lot of uncertainty in data
Athena	Canada	Athena Sustainability Institute	<ul style="list-style-type: none"> The best construction specific tool compared to others Allows to analyse the elements of a building separately Representation of results is simple and understandable All the life cycle stages can be analyzed 	<ul style="list-style-type: none"> Applicable to only American context Although defined as a construction specific tool, it does not cover every aspect of the construction stage
LCAid	Australia	NSW DPWS	<ul style="list-style-type: none"> User friendly and easy to use Ability to load material quantities from 3D drawings Covers many impact indicators Able to evaluate & benchmark cost & environmental impacts 	<ul style="list-style-type: none"> Applicable only to Australian context Only concentrates on operation phase Construction phase is not given much consideration
ENVEST	United Kingdom	BEE	<ul style="list-style-type: none"> Separate analysis for both cost and environmental analysis High data sharing options Simplifies a complex design process for easy evaluation of environmental impacts 	<ul style="list-style-type: none"> Inventory is mainly based in UK Construction phase is given minimum consideration Uncertainties in inventories

ANNEXE- 4 TABLEAUX DES RÉSULTATS PAR NIVEAU D'ANALYSE

Tableau 1 : Détail du bilan carbone classique

	PRODUCT ION	CONSTRUCTI ON	USAGE SANS ENERGIE	ENERGIE	FIN DE VIE	TOTAL	Part de l'énergie consomé	
Maison ERE 132	1.73E+04	2.67E+03	7.52E+03	1.59E+05	1.10E+03	1.87E+05	85%	kg CO2 eq
Maison Béton	3.99E+04	4.40E+03	7.67E+03	1.59E+05	2.69E+03	2.14E+05	74%	kg CO2 eq
Maison Biosourcée	1.80E+04	2.67E+03	7.52E+03	1.59E+05	1.10E+03	1.88E+05	84%	kg CO2 eq

Tableau 2 : Détail du bilan carbone corrigé

	PRODUCT ION	CONSTRUCTI ON	USAGE SANS ENERGIE	ENERGIE	FIN DE VIE	TOTAL	Part de réduction	
Maison ERE 132	1.73E+04	2.67E+03	5.71E+03	1.21E+05	5.47E+02	1.47E+05	22%	kg CO2 eq
Maison Béton	3.99E+04	4.40E+03	5.83E+03	1.21E+05	1.33E+03	1.72E+05	19%	kg CO2 eq
Maison Biosourcée	1.80E+04	2.67E+03	5.71E+03	1.21E+05	5.47E+02	1.48E+05	22%	kg CO2 eq

Tableau 3 : Détail du bilan carbone corrigé avec et sans prise en compte du stockage du carbone

	PRODUCT ION	CONSTRUCTI ON	USAGE SANS ENERGIE	ENERGIE	FIN DE VIE	TOTAL	Réduction liée au stockage	
Avec stockage	-2.21E+04	2.67E+03	5.71E+03	1.21E+05	2.04E+04	1.27E+05	14%	kg CO2 eq
Sans Stockage	1.80E+04	2.67E+03	5.71E+03	1.21E+05	5.47E+02	1.48E+05		kg CO2 eq